

# Évaluation des risques liés au transfert des polluants à travers les sols et vers les nappes

*Rapport final à la convention de recherche entre le ministère de l’Outre-mer et le Cirad*

*par*

Frédéric FEDER  
coordinateur du projet

Avec la collaboration de  
Jean-Guillaume ROBIN  
VCAT, chargé d’études

et de  
Gérard BOURGEON  
ingénieur pédologue CIRAD, consultant





# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>7</b>
1.1	Objectif et contexte du projet.....	7
1.1.1	Objectif .....	7
1.1.2	Contexte .....	7
1.2	Méthodologie .....	8
1.3	Rappel du calendrier prévisionnel .....	8
<b>2</b>	<b>SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>9</b>
2.1	Analyse bibliographique .....	9
2.1.1	Données relatives au milieu physique de la zone d'étude .....	9
2.1.2	Méthode d'évaluation d'un risque environnemental.....	9
2.2	Organisation du chantier d'acquisition des données .....	13
2.3	Mesures pédologiques réalisées in situ.....	14
2.4	Mesures au laboratoire.....	15
<b>3</b>	<b>RÉSULTATS OBTENUS SUR LES SOLS.....</b>	<b>17</b>
3.1	Typologie des sols.....	17
3.1.1	Les groupes de sols de la zone étudiée.....	17
3.1.2	Synthèse et conclusions partielles .....	19
3.2	Cartographie des sols de la zone d'étude.....	19
3.2.1	Les milieux de haute altitude.....	19
3.2.2	Les hautes planèzes bosselées.....	19
3.2.3	Les moyennes planèzes à topographie ondulée.....	19
3.2.4	Les extrémités de planèzes à topographie ondulée.....	20
3.2.5	Les unités cartographiques diverses .....	22
3.3	Évaluation des temps de transfert de l'eau à l'aide du traçage isotopique .....	22
3.3.1	But et principes généraux de ces études .....	22
3.3.2	Choix des sites de mesure .....	22
3.3.3	Calcul des concentrations en traceurs .....	23
3.3.4	Mesures in situ .....	24
3.3.5	Résultats et discussion des analyses de nitrates et d'isotopes.....	25
3.3.6	Conclusions de cette expérimentation.....	28
<b>4</b>	<b>VULNÉRABILITÉ AU TRANSFERT DE POLLUANTS VERS LA NAPPE.....</b>	<b>29</b>
4.1	Les grandes méthodes de modélisation .....	29

4.1.1	<i>Les méthodes de simulation mécanistes .....</i>	29
4.1.2	<i>Les méthodes statistiques .....</i>	29
4.1.3	<i>Les méthodes de cartographie à index.....</i>	29
4.1.4	<i>Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères .....</i>	31
4.1.5	<i>Les autres outils de modélisation : exemple de la méthode Siris.....</i>	31
<b>4.2</b>	<b>Choix de la méthode de modélisation.....</b>	<b>33</b>
<b>4.3</b>	<b>Démarche d'agrégation des données utilisées et résultats synthétiques.....</b>	<b>34</b>
4.3.1	<i>Adimensionnalisation des variables .....</i>	34
4.3.2	<i>Agrégation et pondération des variables – modèle à indexation et pondération .....</i>	34
4.3.3	<i>Carte de vulnérabilité – modèle à indexation et pondération .....</i>	35
4.3.4	<i>Carte de vulnérabilité – modèle Siris .....</i>	35
4.3.5	<i>Comparaison et analyse des résultats obtenus avec les deux modèles .....</i>	35
<b>5</b>	<b>SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS .....</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>ANNEXE 1 : DESCRIPTIONS DES FOSSES PÉDOLOGIQUES .....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES ANALYSES .....</b>	<b>61</b>

## Préambule

L'objet de cette convention de recherche entre le ministère de l'Outre-mer et le Cirad de la Réunion (représenté par son directeur régional) a été de réaliser une cartographie de la vulnérabilité des sols aux transferts de polluants vers la nappe. La zone d'étude est comprise entre la ravine des Avirons au sud et la rivière des Galets au nord dans la zone ouest de l'île de la Réunion.

L'ensemble de ces travaux ont été réalisés au sein de l'unité de recherche du Cirad « risque environnemental lié au recyclage » (UPR 78, [http://www.cirad.fr/ur/recyclage\\_risque](http://www.cirad.fr/ur/recyclage_risque)). Les principales personnes ayant contribué à ces travaux sont : Frédéric Feder (coordinateur, chercheur au Cirad Réunion), Jean-Guillaume Robin (volontaire civil à l'aide technique de mars 2006 à février 2008 au Cirad Réunion) et Gérard Bourgeon (consultant comme ingénieur pédologue, Cirad Montpellier). Par ailleurs, Alodie Blondel (stagiaire de Master 2 de l'université d'Avignon) et Éric Nicolini (maître de conférence à l'université de la Réunion) ont participé à la partie concernant le traçage isotopique.

Le présent rapport est une synthèse des travaux menés depuis le 25 avril 2006, date de signature de la convention, pour cette étude ci-après désignée « le projet ».

Dans une première partie, nous rappellerons le contexte et les objectifs du projet tels qu'ils ont été définis dans la convention. Ensuite, dans une seconde partie, nous présenterons une synthèse bibliographique sur le milieu physique de la zone d'étude et sur les concepts de vulnérabilité. Dans la troisième partie, nous détaillerons les résultats obtenus sur la caractérisation pédologique de la zone d'étude. La quatrième partie présentera les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité puis nous expliciterons la démarche que nous avons retenue pour établir une cartographie de la vulnérabilité des nappes sur la zone d'étude du projet. Enfin, nous conclurons ce rapport.



# 1 INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1.1 Objectif et contexte du projet

### 1.1.1 Objectif

Ce projet a pour objectif général la réalisation d'une carte de vulnérabilité liés au transfert des polluants à travers les sols et vers les nappes phréatiques sur le versant occidental de l'île de la Réunion. Précisément, la zone est comprise entre la rivière des Galets au nord et la ravine des Avirons au sud.

### 1.1.2 Contexte

La population de l'île de la Réunion ne cesse de croître ; on estime qu'en 2020, elle aura atteint plus d'un million de personnes. Inévitablement, l'augmentation de l'activité agricole et le développement urbain génèrent de plus en plus de déchets et de sous-produits susceptibles de présenter des risques environnementaux. Progressivement, le recyclage et la valorisation de ces déchets deviennent une préoccupation majeure. Des solutions existent aujourd'hui mais elles ne répondent que ponctuellement aux nombreux problèmes posés. Les principaux risques pour l'environnement sont liés aux pollutions des ressources vitales : l'eau et le sol essentiellement mais aussi dans une moindre mesure à la Réunion, l'air. Cependant, la multiplicité des polluants et la diversité des sols rendent impossible une étude systématique de tous les risques dans toutes les situations.

C'est pourquoi nous avons proposé de quantifier et de hiérarchiser les principales propriétés des sols susceptibles de modifier voire d'interagir avec les polluants lors de leur transfert vers les nappes. La région concernée est située sur le flanc ouest du piton des Neiges, sous le vent. Au sein de cette zone, nous avons commencé par étudier un secteur de référence compris entre la Grande ravine au nord et la ravine de la Fontaine au sud (figure 1).



Figure 1 : localisation de la zone d'étude (limites rouges) et du secteur de référence (limites jaunes) à l'échelle de la Réunion.

## 1.2 Méthodologie

Au plan de la méthode, il était proposé d'établir cette carte des risques liés au transfert des polluants à travers les sols et vers les nappes à partir des paramètres suivants :

- les capacités d'échange cationique (CEC) et anionique (CEA) des sols ;
- les teneurs en matière organique et en minéraux mal cristallisés des sols (extraction du fer, de l'aluminium et du silicium à l'oxalate d'ammonium à pH 3) ;
- la conductivité hydraulique (méthode Beerkan), la granulométrie, la pierrosité et la profondeur des sols ;
- le pourcentage de l'eau participant réellement aux transferts déterminé par traçage isotopique.

Deux étapes principales étaient identifiées pour le faire :

- la première consistait à définir, pour chacune de ces propriétés, des unités typologiques homogènes ;
- dans la seconde étape, à l'aide de l'ensemble des informations recueillies, l'importance relative des différentes propriétés vis-à-vis des transferts d'eau était évaluée. Pour cela, un modèle conceptuel de la sensibilité du milieu à ces risques était proposé en s'inspirant de travaux déjà réalisés par ailleurs ; ce modèle servant de base à l'élaboration finale d'une carte des risques potentiels de pollution liés aux transferts.

## 1.3 Rappel du calendrier prévisionnel

Un calendrier sur deux années était proposé pour la réalisation complète de ce projet, il a été globalement respecté.

Mai et juin 2006 : prise de contact et mise à jour des connaissances bibliographique et terrain.

Juillet et août 2006 : campagne de terrain sur le secteur de référence (figure 1).

Septembre et octobre 2006 : réalisation des mesures de laboratoires.

Novembre, décembre, janvier et février 2007 : synthèse des premiers résultats.

Mars 2007 : premier bilan intermédiaire, rapport d'étape.

Avril et mai 2007 : intégration des données dans le SIG.

Juin, juillet, août et septembre 2007 : seconde campagne de terrain.

Octobre et novembre 2007 : réalisation des mesures de laboratoires.

Décembre 2007 : analyses, interprétations et synthèse de tous les résultats.

Janvier et février 2008 : finalisation des résultats.



## 2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET MÉTHODOLOGIE

### 2.1 Analyse bibliographique

La zone ouest de l'île de la Réunion est un territoire soumis à de multiples contraintes. Le développement, parfois non maîtrisé, de l'urbanisation se fait au détriment de terres précédemment cultivées. Les récentes infrastructures hydrauliques (projet de basculement des eaux d'est en ouest) ont permis l'irrigation de nouvelles surfaces agricoles. Cependant, l'utilisation d'intrants organiques et minéraux augmente les risques de pollution de la nappe phréatique de cette zone.

L'analyse bibliographique a porté sur deux aspects principaux : les données relatives au milieu physique de notre zone d'étude et les méthodes d'évaluation d'un risque environnemental.

#### 2.1.1 *Données relatives au milieu physique de la zone d'étude*

L'étude bibliographique a permis de regrouper et de synthétiser les informations existantes et nécessaires à la réalisation du projet. Il est apparu également que les données pédologiques existantes étaient insuffisantes et nécessitaient une complète mise à jour. Le territoire étudié présente une grande variabilité spatiale et de nombreuses spécificités environnementales. Plusieurs études pédologiques se sont succédées au sein de cette zone ; la plus conséquente est celle réalisée par le Cirad pour la région Réunion et synthétisée par Raunet (1991). Les types de sols sont classés par grandes familles et montrent une différenciation liée à la nature de la roche mère, à leur évolution pédogénétique et à leur utilisation actuelle. Toutefois, le document le plus récent est l'étude des sols le long d'une toposéquence passant la station du Cirad des Colimaçons (Feder *et al.*, 2006) ; il est plus adapté à notre démarche.

#### 2.1.2 *Méthode d'évaluation d'un risque environnemental*

##### 2.1.2.1 *Généralités et définitions*

L'analyse de travaux similaires réalisés dans d'autres contextes (Koller *et al.*, 2004) a permis de préciser considérablement l'aspect méthodologique du projet. En effet, les concepts de risques, d'aléas et de vulnérabilité sont définis précisément et correspondent à des étapes successives selon le schéma ci-dessous (figure 2).

Le risque environnemental est indissociable d'une composante « *aléa* » (probabilité de survenance d'un phénomène susceptible d'affecter l'intégrité des eaux souterraines) et d'une composante « *vulnérabilité* » (tendance à la dégradation de la nappe en réponse aux dommages qui peuvent lui être causés). Albinet et Margat (1970) proposent que « la vulnérabilité d'un aquifère soit la possibilité de percolation et de diffusions de polluants depuis la surface jusqu'à la nappe, dans des conditions naturelles ». Ceci implique la notion de la protection de la nappe par le milieu physique qui se situe au dessus d'elle.

En effet, les matériaux terrestres peuvent agir comme des filtres naturels et limiter le transfert des polluants. Cependant, cette capacité des matériaux de sub-surface résulte d'une interaction complexe de processus physiques, chimiques et biologiques dans le système sol-roche-aquifère ; c'est pour cela que le potentiel de protection du milieu physique est très variable. La cartographie des propriétés du milieu physique intervenant dans ces processus et de leur variabilité permet ainsi d'identifier les zones géographiques les plus vulnérables quant au transfert de polluants vers les nappes (Schnebelen, *et al.*, 2002).

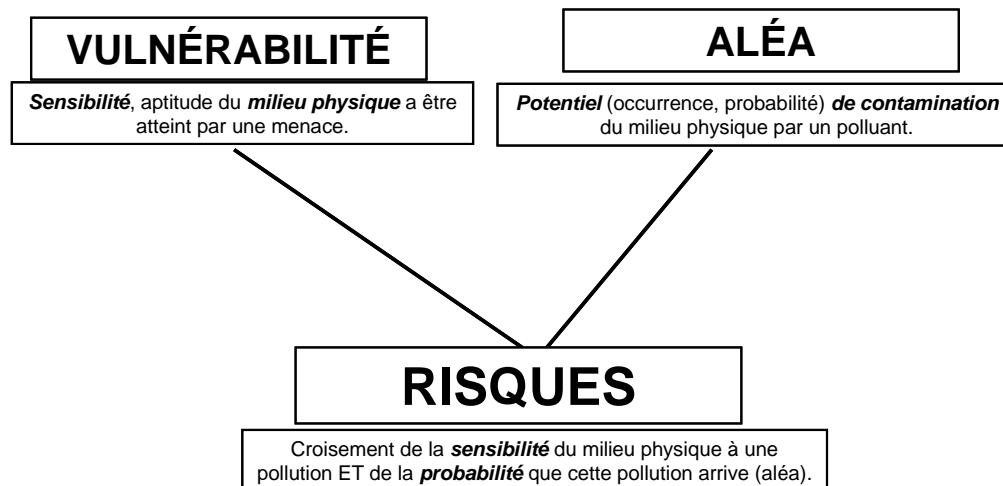
Dans le cadre d'une démarche générique, telle que celle que nous avons défini vis-à-vis du transfert des polluants vers les nappes, l'étude bibliographique nous a amené à retenir les deux types de vulnérabilités envisagés par Schnebelen, *et al.* (2002) :

- *la vulnérabilité intrinsèque*, qui prend en compte les caractéristiques et les propriétés générales du milieu physique (tableau 1) ;
- *la vulnérabilité spécifique*, caractéristique d'un polluant ou d'un groupe de polluants ayant des propriétés identiques.

Les propriétés du milieu physique qui interviennent dans la vulnérabilité intrinsèque sont essentiellement celles des différents horizons des sols. Ainsi, les capacités d'échange cationique (CEC) et anionique (CEA), les teneurs en matière organique et en minéraux mal cristallisés, la conductivité hydraulique, la granulométrie, la pierrosité, la profondeur des sols ou encore le pourcentage de l'eau participant réellement aux transferts sont les principales caractéristiques à prendre en compte pour déterminer *la vulnérabilité intrinsèque*. Les cartographies pédologiques précédemment réalisées dans les années 1980 ne nous renseignent pas sur la plupart de ces propriétés ni, bien entendu, sur leur répartition géographique dans la zone d'étude. C'est pour cela qu'il est apparu indispensable de commencer par une cartographie pédologique de notre secteur.

Tableau 1 : résumé des critères de la vulnérabilité intrinsèque.

Vulnérabilité intrinsèque		
SOL	ZONE NON SATURÉE	ZONE SATURÉE
Topographie (pente)	Profondeur de la nappe libre ou épaisseur de la ZNS	Type de nappe
Propriétés physiques et chimiques (perméabilité, nature, texture, CEC, etc.)	Temps de transfert	Temps de résidence
Bilan hydrique (ruissellement et infiltration efficace)		Relation eau souterraine /vs/ eau de surface
	Structure de la ZNS	Piézométrie
	Présence ou non d'un horizon moins perméable et position de celui-ci	Épaisseur de l'aquifère
		Recharge de la nappe
		Type de système hydrogéologique
	Battement de la nappe	
Fracturations (direction et densité)		



- La texture qui, lorsqu'elle est grossière favorise l'infiltration ; inversement plus la texture est fine plus le front d'infiltration progresse lentement (Gaines et Gaines, 1994). Cela s'explique par la taille des pores : les textures grossières (sableuses) ménagent des pores larges qui facilitent le transfert de l'eau et des matières solubles (Huddleston, 1996).
- Les matières organiques qui aident à créer et à stabiliser des agrégats de grains de sables, d'argile et de limons et des espaces inter-agrégats relativement larges permettant un mouvement de l'eau plus rapide (Huddleston, 1996).
- La densité qui est un bon indicateur de porosité, plus un sol est compact et dense, plus les vitesses d'infiltration sont faibles (Huddleston, 1996).

*Le taux de matière organique* : la matière organique fournit un grand nombre de sites de liaison puisqu'elle présente une grande surface de contact et est chimiquement très réactive ; elle affecte la sorption d'un polluant. La quantité de matière organique influe directement sur le pH puisqu'elle est essentiellement composée d'acides organiques et humiques. Le pH du sol peut modifier la répartition des charges sur le polluant (si celui-ci n'est pas neutre) et ainsi favoriser la sorption du polluant sur le complexe argileux. Le pH peut également jouer sur la charge du complexe argileux et ainsi augmenter la CEC (capacité d'échange cationique) ou la CEA (capacité d'échange anionique) assurant également la sorption de polluant (Huddleston, 1996 ; Sheng *et al.*, 2005). La CEC et la CEA peuvent également intervenir dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité spécifique.

*La quantité d'argile* : de la même manière que pour la matière organique, le complexe argileux offre une surface de liaison très importante et très réactive vis-à-vis de cations ou d'anions. Le complexe argileux agit de la même manière que les matières organiques sur la sorption. Il devient très important sous les horizons de surface, là où le taux de matière organique est nettement plus faible qu'en surface (Gaines et Gaines, 1994 ; Huddleston, 1996).

D'autres variables interagissent sur la vulnérabilité intrinsèque liée au sol comme l'épaisseur du sol par exemple. Elle agit sur le temps que peut mettre un polluant pour atteindre la nappe. On distingue ainsi deux grands types de critères relatifs au sol : ceux qui influencent la vitesse de progression de l'eau et des solutés qu'elle transporte et ceux qui influencent la rétention et le stockage de polluants dans les sols.

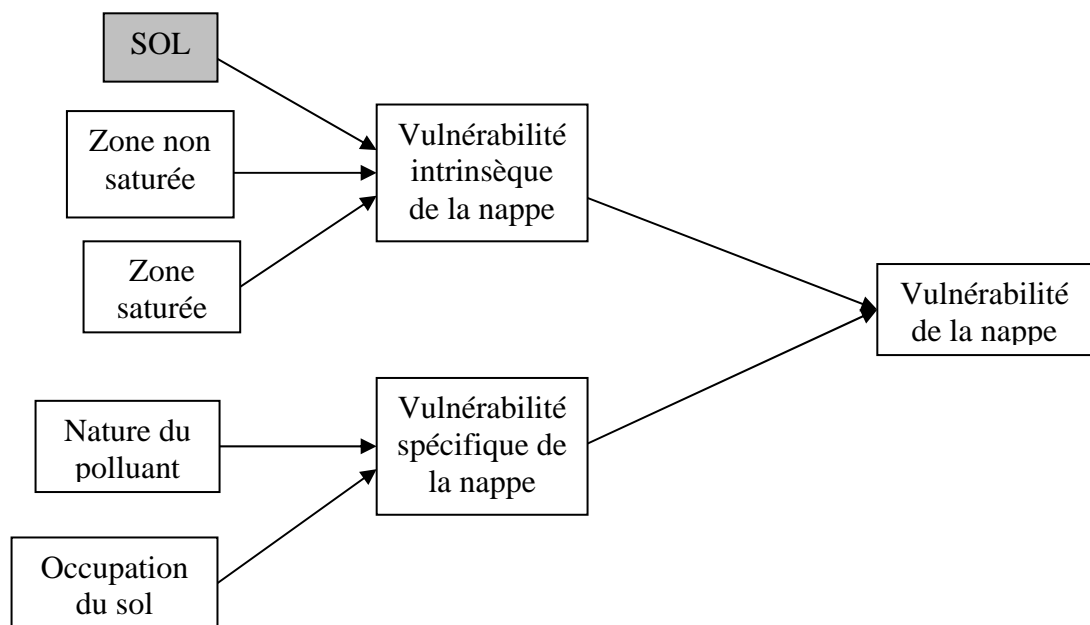


Figure 3 : schéma des composantes d'étude des deux types de vulnérabilité de la nappe.

#### 2.1.2.2.2 Les critères relatifs à la zone non saturée (Bezèlques et Garets, 2002)

Les principaux critères relatifs à la ZNS (ou zone non saturée) sont :

- la profondeur d'apparition du toit de la nappe libre qui conditionne le temps de transfert d'un polluant jusqu'à la nappe et donc sa possible dégradation au cours du transfert.
- l'amplitude du battement de la nappe : conditionne l'épaisseur du recouvrement de la nappe (sol + ZNS).
- la perméabilité verticale de la zone non saturée : elle dicte le temps de transfert vertical d'un polluant.
- la structure de la ZNS : les variations de faciès, l'épaisseur des discontinuités, la texture, la teneur en MO conditionnent la migration des fluides vers la nappe.

#### 2.1.2.2.3 Les critères relatifs à la zone saturée

Pour la zone saturée, les critères à prendre en compte sont les suivants :

- Le type de nappe (libre ou captive) : l'absence d'horizon imperméable confère à la nappe un caractère plus vulnérable que ne l'est une nappe captive protégée par des formations imperméables.
- Les paramètres hydrodynamiques : ils déterminent la vitesse de migration des polluants et le temps de résidence de ceux-ci dans la zone saturée.
- La direction et le sens de l'écoulement.
- Le type de système hydrogéologique : la vulnérabilité d'un tel système peut être appréhendée à partir de la connaissance de sa réactivité aux événements pluviométriques.
- Les relations nappe/cours d'eau.
- L'épaisseur de l'aquifère.

## 2.2 Organisation du chantier d'acquisition des données

Il avait été décidé de réaliser l'acquisition des données sur la zone d'étude en deux temps intitulés première et seconde campagnes de terrain.

Comme cela a été signalé ci-dessus, l'organisation du chantier de la première campagne s'est faite autour de la toposéquence des Colimaçons (Olivier, 2005 ; Feder *et al.*, 2006) en veillant à compléter la représentativité de l'échantillonnage représenté par cette toposéquence. En effet, il apparaissait que la variabilité des sols était plus importante dans la partie basse du versant d'étude et la densité des observations de Olivier (2005) au sein de cette zone était moindre. Cette toposéquence a donc été prise comme axe central pour la délimitation d'un secteur à prospecter qui a été nommé « secteur de référence » par analogie à ce qui se fait fréquemment réalisé en cartographie lorsque l'étude d'un périmètre restreint permet de formuler des hypothèses fortes sur la distribution des sols dans le paysage qui serviront ensuite à l'extrapolation des résultats à une zone plus vaste.

Aux quatorze fosses ouvertes par Olivier (2005) sont donc venues s'ajouter vingt-deux fosses, après la première campagne, puis trente quatre nouvelles fosses après la seconde campagne, comme illustré figure 4. Toutes les fosses ont été creusées jusqu'à 150 cm de profondeur ou jusqu'à la roche mère si celle-ci apparaissait avant. Ces fosses ont permis de décrire autant de profils numérotés R-JGR-F1 à R-JGR-F57. Elles étaient suffisamment larges (au minimum 1 m × 1 m) pour permettre à une personne de s'y mouvoir sans contrainte, notamment pour y réaliser l'ensemble des observations pédologiques ainsi que les mesures *in situ*.

L'ensemble des descriptions pédologiques (*in situ*) et des résultats d'analyses en laboratoire ont été reportés dans les cahiers de laboratoire du Cirad suivants :

- 0594/70/23 ;

- 2005/962/UPR78 ;
- 2005/963/UPR78 ;
- 2005/967/UPR78.

Ces cahiers ont été régulièrement vérifiés et contresignés par un tiers témoin habilité ; ceci afin de garantir la traçabilité de tous les travaux de nature technique, expérimentale et scientifique effectués au sein du Cirad. Ces cahiers seront ensuite archivés pendant un minimum de vingt ans en cohérence avec la démarche qualité mise en œuvre au Cirad.

Un aliquote des échantillons de sol est toujours conservé, avant séchage, dans la pédothèque du Cirad de la Réunion en chambre froide à 5°C ; ceci afin de réaliser des analyses complémentaires ou de vérifier certaines données si nécessaire. Les échantillons analysés au laboratoire d'analyse du Cirad à Montpellier sont également archivés pendant trois ans.

### 2.3 Mesures pédologiques réalisées *in situ*

Les descriptions de profils ont été faites selon les normes préconisées notamment par l'Inra (NF X 31-003, AFNOR 1998), sur la base de critères internationalement reconnus (FAO, 2006) et selon un système standardisé pour la description des sols et des méthodes d'analyses de laboratoire. Ce système est appelé « Système de Transfert de l'Information Pédologique et Agronomique (STIPA) ». Il comprend un manuel précisant les variables et les codes pour la description des sols. Il inclut également des programmes de gestion informatique des données. Les descriptions complètes de nos fosses ainsi que les résultats d'analyse sont archivées au sein de la base de données nationale de l'Inra (Donesol, version 3). Cette base de données n'est pas ouverte. Les noms des profils de références sont construits sur la base d'un radical (R-JGR) correspondant à notre référence interne Cirad suivi du numéro de la fosse précédé de « F ». Toutes les descriptions des fosses sont résumées dans l'annexe 1. Les observations et prélèvements ont été effectués sur la face du profil la plus haute et perpendiculaire à la pente. Les altitudes et les coordonnées de chaque fosse ont été acquises grâce à un GPS de marque Trimble (modèle GeoXM). Les coordonnées fournies par le GPS sont en degré, minutes et secondes dans le système de coordonnées « piton des Neiges ». Cependant le modèle de coordonnées du logiciel de traitement d'information géographique impose un format en mètres. Les coordonnées ont donc été transformées en mètres dans le système de coordonnées standard de la Réunion (RGR 92 – UTM 40 sud), projection « transverse mercator ». Les pentes ont été calculées à partir du modèle numérique de terrain. Elles ont été attribuées à chaque profil en réalisant une jointure spatiale entre la carte des pentes (dérivée du MNT) et la carte de localisation des profils.

Les mesures de densités apparentes par prélèvement de cylindres de volume connu (NF X 31-501, AFNOR 1992) ont été réalisées à raison de trois répétitions par horizon. Pour chacune des fosses ont également été réalisés des mesures de conductivité hydraulique à l'aide de la méthode Beerkan (Findeling, 2001 ; Lassabatère *et al.*, 2006).

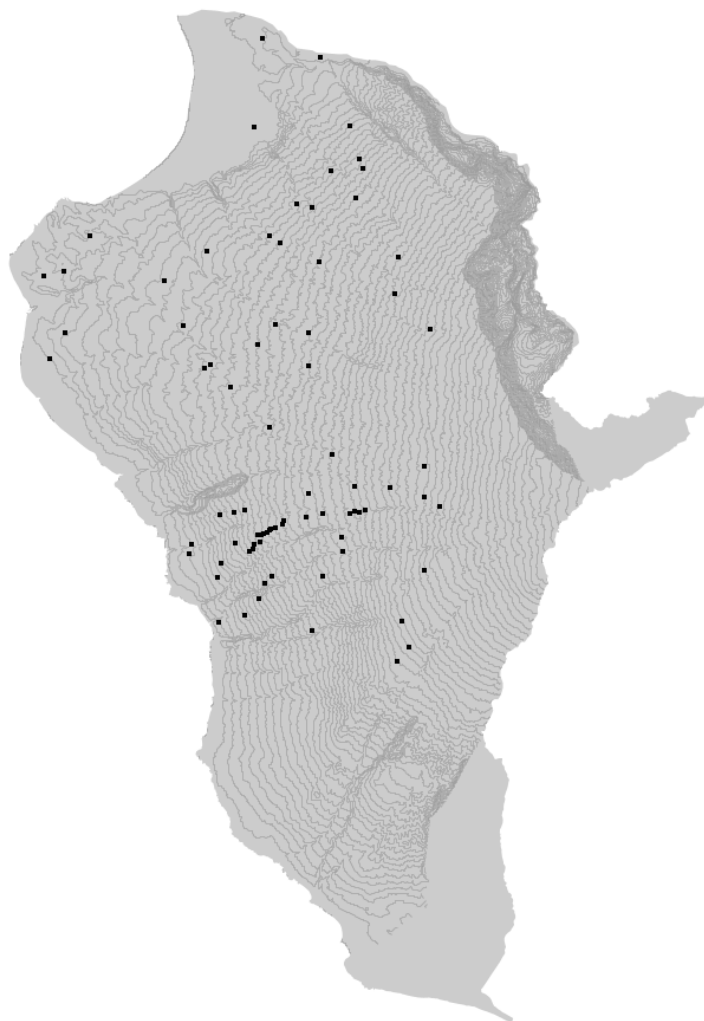


Figure 4 : localisation de l'ensemble des fosses pédologiques sur la zone d'étude.

## 2.4 Mesures au laboratoire

Pour chaque fosse, chaque horizon a fait l'objet de deux prélèvements de sol. Les échantillons prélevés à l'aide des cylindres pour la mesure de la densité apparente ont été conservés dans des sachets hermétiques. Ils ont ensuite été pesés humides, puis séchés à l'étuve à 105 °C. Ceci a permis de calculer leur masse volumique ainsi que leur teneur en eau au moment du prélèvement. La campagne de prospection pédologique et de prélèvements a été réalisée de façon à pouvoir raisonnablement faire l'hypothèse que les sols étaient alors dans un état physique proche du pF 4,2. Cette valeur est utilisée dans les classifications pédologiques pour déterminer le caractère « *hydric* » des sols andiques.

Le second prélèvement de sol a été séché à l'air (pendant deux semaines environ) avant d'être broyé et tamisé à deux millimètres à l'aide d'une passoire à trous ronds (NF ISO 11464 X31-412, AFNOR 1994). La première partie des analyses a été réalisée au laboratoire de la station du Cirad de la Bretagne (Saint-Denis) :

- mesure du  $\text{pH}_{\text{eau}}$ , du  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  et de la conductivité électrique (NF ISO 10390 X31-117, AFNOR 1994) ;

- mesure du  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  : protocole 4C1a1a1a-b1, (Soil Survey Staff, 2004).

La seconde partie des analyses a été réalisée par le laboratoire d'analyse des sols et des plantes du Cirad à Montpellier ; celui-ci est certifié ISO 9001 depuis 2003 par l'Afaq :

- taux de carbone organique et d'azote total à l'analyseur élémentaire ;
- rétention des phosphates (méthode de Blakemore, protocole 4D8a1a-b1, Soil Survey Staff, 2004) ;
- fer, aluminium et silicium extractibles par l'oxalate d'ammonium à pH 3 et représentant les oxydes mal cristallisés ;
- fer, aluminium et silicium extractibles par le réactif CBD (citrate-bicarbonate-dithionite) représentant les oxydes bien cristallisés ;
- fer et aluminium extractibles par le pyrophosphate de sodium et représentant les éléments liés à la matière organique (complexes organo-métalliques) ;
- capacité d'échange cationique (CEC) et bases échangeables à l'acétate d'ammonium 1 M tamponné à pH 7 ;
- acidité d'échange au KCl 1 N ;
- densité optique de l'extrait à l'oxalate (protocole 4G, Soil Survey Staff, 2004) ;
- granulométrie en cinq fractions, méthode à la pipette après destruction de la matière organique par l'eau oxygénée et dispersion par l'hexamétaphosphate de sodium. La dispersion est parfois améliorée par un traitement aux ultra-sons (appareil Vibracell 75041 – AGTT-00366 de 750 W, équipé d'une sonde de 13 mm et utilisé à 75 % de sa puissance).

Ces différentes analyses ont été réalisées au cours des deux mois qui ont suivi la réception des échantillons à Montpellier. Les résultats d'analyse des fosses sont répertoriés dans l'annexe 2, ils ont permis l'interprétation pédologique complète de la zone d'étude.

Indépendamment de ces analyses qui sont réalisées en routine, des recherches ont été réalisées dans les laboratoires de Montpellier pour caractériser la CEA (capacité d'échange anionique) de trois profils (Gillman et Sumner, 1987). Cette analyse, qui demande beaucoup de temps ne peut en effet être faite en routine sur de nombreux échantillons.



### 3 RÉSULTATS OBTENUS SUR LES SOLS

#### 3.1 Typologie des sols

L'objectif de cette interprétation des résultats d'observation et d'analyse des sols était d'arriver à définir des unités typologiques. Pour cela, le recours à une classification pédologique moderne s'imposait.

Le système taxonomique de la WRB a été choisi (WRB pour World Reference Base for soil resources : IUSS Working Group WRB, 2006). Cette classification prend en effet en compte pratiquement toutes les propriétés des sols (observées et/ou analysées) qui servent à définir la vulnérabilité. Comme son nom l'indique, cette classification est universellement reconnue et son utilisation dans le cadre du projet permettra les échanges, la réactualisation et des applications multiples, autres que celle qui est l'objet du présent projet. Elle répond aux recommandations de la directive européenne sur la protection des sols qui préconise de prendre en compte les types de sols.

La WRB s'utilise à l'aide d'une clé d'identification des types de sols à l'image de ce qui fait à l'aide d'une flore pour les végétaux. La WRB reconnaît trente deux groupes de référence au niveau mondial (Reference Soil Groups, en abrégé RSGs). Sur ces trente deux groupes, huit ont été identifiés dans la zone d'étude ; ce qui témoigne d'une grande variabilité pédologique relativement à la surface considérée. Ces huit groupes sont détaillés ci-dessous dans l'ordre où l'application de la clé de la WRB permet de les identifier. Ils correspondent également à des sols situés, en premier lieu, sur le haut du versant puis sur les parties moyennes et basses du versant (figure 5), puis à des sols plus ubiquistes quant à leur distribution altitudinale.

##### 3.1.1 Les groupes de sols de la zone étudiée

– Les Andosols (AN) : depuis Bertrand (1972) et Zebrowski (1975) qui avaient diagnostiqué le caractère andique des sols des parties hautes du versant (altitudes supérieures à 900 mètres), toutes les études pédologiques ont montré que les Andosols occupaient une place importante sur le versant occidental de l'île de la Réunion. Les critères d'identification de ce groupe de sols ont été modifiés et précisés au cours du temps au sein des différents systèmes de taxonomies dans le sens d'une plus grande rigueur et en s'appuyant progressivement sur davantage de critères analytiques. De ce fait, il y a moins d'Andosols diagnostiqués aujourd'hui qu'il n'y en avait par le passé lorsque seules les valeurs prises par le  $\text{pH}_{\text{NaF}}$  étaient prises en compte. Pour la WRB, la détermination analytique du groupe des Andosols s'appuie sur les trois critères suivants :

- (i) les valeurs de la densité apparente (elles doivent être inférieures à 0,9) ;
- (ii) la somme «  $\text{Al}_{\text{ox.}} + \frac{1}{2} \text{Fe}_{\text{ox.}}$  » des éléments extraits à l'oxalate (indicateur de la présence de quantités importantes de minéraux mal cristallisés et devant être supérieure à 2 %) ;
- (iii) le pouvoir de rétention des phosphates (qui doit présenter des valeurs d'au moins 85 %).

Pour illustrer ce propos, l'interprétation des données pédologiques issues des travaux du Cirad par Raunet (1991) donne une limite basse des Andosols non perhydratés nettement différente de celle du groupe des Andosols selon la WRB. Ceci n'est pas sans intérêt pour le projet puisque cela a pour conséquence de réduire significativement la superficie totale des Andosols. Or, les sols qui sont regroupés dans ce groupe présentent des propriétés homogènes et sont plus riches en minéraux mal cristallisés que ceux situés plus bas et ils auront également un comportement différent vis-à-vis de certains polluants.

Au sein du groupe des Andosols, la distinction entre les sols ayant une teneur en eau supérieure à 100 % (à pF 4,2 *i.e.* en saison sèche correspondant donc au caractère « *hydric* » selon la terminologie WRB et proche du caractère perhydraté des systèmes antérieurs) et les autres est aisée au vu des résultats analytiques. Elle apparaît néanmoins difficile à matérialiser par une limite cartographique.

- Les Podzols (PZ) constituent le second groupe de référence identifié lorsque l'on applique la clé de détermination de la WRB. De même que l'andosolisation, la podzolisation a été clairement identifiée par Zebrowski (1975) mais dès 1960, Riquier parlait déjà de « sols à voune et mascareignite ». Ces Podzols présentent, en effet, généralement un horizon sub-superficiel sableux composé essentiellement de phytolithes : la mascareignite. Ceci a amené Raunet (1991) à utiliser le terme d'Andosols à mascareignite préférentiellement à celui de Podzols qui implique un processus de migration de complexes organo-métalliques au sein du profil. Les analyses effectuées lors de notre étude ont bien montré que cette migration a eu lieu, elle est mise en évidence par les variations de la densité optique de l'extrait oxalate (*e.g.* profil R-JGR-F18, annexe 2). Ces Podzols se retrouvent sous des types de végétation particuliers et leur cartographie est donc relativement aisée.

- Les Phaeozems (PH) correspondent à des sols présentant une relative accumulation organique dans les horizons de surface (critères de couleur et de teneur en carbone organique). Leur complexe d'échange est, de plus, bien saturé (saturation en bases échangeables supérieure à 50 % sur la majeure partie du profil). Ils caractérisent les zones les moins pentues du bas du versant et correspondent à l'ancienne dénomination « sols bruns eutrophes » de Raunet (1991). Mais une fois encore, les critères de la WRB sont plus stricts que ceux des anciens systèmes et un pourcentage important de ces sols bruns se retrouve aujourd'hui classé en sols peu évolués (ou Cambisols).

- Les Umbrisols (UM) : ils constituent l'équivalent « désaturé » des Phaeozems et présentent une relative accumulation organique dans les horizons de surface (mêmes critères de couleur et de teneur en carbone organique que pour les Phaeozems) mais le taux de saturation doit être inférieur à 50 % sur la majeure partie du profil. Ils succèdent immédiatement aux Andosols à la limite basse de ces derniers mais cette règle semble non systématique car, si les critères de couleur relativement contraignants ne sont pas respectés, on passe directement à des Cambisols. Par comparaison avec la typologie de Raunet (1991), ils correspondent pour partie aux sols bruns andiques et pour partie à certains Andosols non perhydratés et désaturés.

- Les Cambisols (CM) : ils se substituent aux groupes précédents (i) lorsque certains critères de classification ne sont pas remplis et (ii) dans les zones soumises à l'érosion où le développement du profil est limité en profondeur (caractère « *leptic* »). Ce groupe des Cambisols regroupe des sols assez disparates au sein duquel nous avons introduit des critères plus discriminants qui permettent de mieux traduire la réalité du terrain. Les sols les plus « rouges » qui aient été décrits (profil R-JGR-F10, *cf.* annexe 1) correspondent par exemple à un *leptic* Cambisol (*chromic*).

- En plus de ces cinq groupes, un profil de Vertisol (VR) a été reconnu mais non échantillonné. Il semble, au vu des observations réalisées au cours de cette étude, que l'extension de ce groupe de sols soit très réduite et limitée à quelques poches au sein de plages associant Phaeozems et Cambisols.

- Des Leptosols (LP), sols très peu épais, ont été repérés, mais non échantillonnés, lors des prospections.

- Les sols hydromorphes inondés ou totalement submergés correspondent uniquement à la zone de l'étang Saint-Paul.

L'absence de sol (affleurement rocheux, falaises, ravines) a également été prise en compte parce que cela correspondra à des points du paysage présentant une vulnérabilité particulière.

### 3.1.2 *Synthèse et conclusions partielles*

Le tableau 2 (page suivante) reprend synthétiquement les grandes correspondances que nous avons mis en évidence entre la carte pédologique de Raunet (1991) établie sur la base de la CPCS (1967) et nos résultats utilisant comme système de classification la WRB (IUSS Working Group WRB, 2006). Ce tableau montre clairement l'impossibilité de passer de façon univoque d'un système de classification à un autre. Cette difficulté s'explique essentiellement par une évolution des critères analytiques et descriptifs utilisés pour ces classifications ainsi que par une moindre part laissée à l'interprétation personnelle du pédologue ; la classification pourrait pratiquement être mise en œuvre par un système expert. Nous justifions bien, a posteriori la nécessité qu'il y avait à effectuer une nouvelle campagne de prospection pédologique. Notre objectif final, dans le cadre de ce projet, étant la réalisation d'une carte thématique (vulnérabilité de la nappe aux pollutions), l'acquisition de propriétés spécifiques indispensables (par exemple la conductivité hydraulique et la capacité d'échange anionique) s'est fait en parallèle à l'étude typologique.

## 3.2 Cartographie des sols de la zone d'étude

Les groupes de référence listés ci-dessus, et servant à la typologie des sols, forment parfois des plages cartographiques importantes (Andosols et Podzols par exemple) ; l'unité typologique (UT) est alors équivalente à l'unité cartographique (UC). Mais le plus souvent, pour les besoins de la cartographie des sols à moyenne échelle, il faut considérer une association d'unités typologiques pour constituer une unité cartographique (UC) définie, par ailleurs, par une forme de relief et/ou un type de roche mère – ici une phase particulière du volcanisme réunionnais – particuliers. Ce sont des unités de pédopaysage associant des caractéristiques pédologiques fondamentales et une prise en compte morphologique de la zone d'étude.

Pour la représentation cartographique de la zone étudiée, nous avons distingué dix unités cartographiques regroupées en quatre grandes zones altitudinales de haut en bas du versant et quatre unités cartographiques indépendantes de ce gradient altitudinal. La figure 5 présente la synthèse de cette cartographie des sols à une échelle proche du 1/100000.

### 3.2.1 *Les milieux de haute altitude*

Ils sont constitués par une seule unité cartographique :

- UC1 : les pavages de blocaille du haut de versant où les affleurements rocheux ménagent entre eux des poches de sols peu profonds (Leptosols).

### 3.2.2 *Les hautes planèzes bosselées*

Leur modelé est hérité des recouvrements cendreux récents et parfois épais. Deux unités cartographiques ont été distinguées :

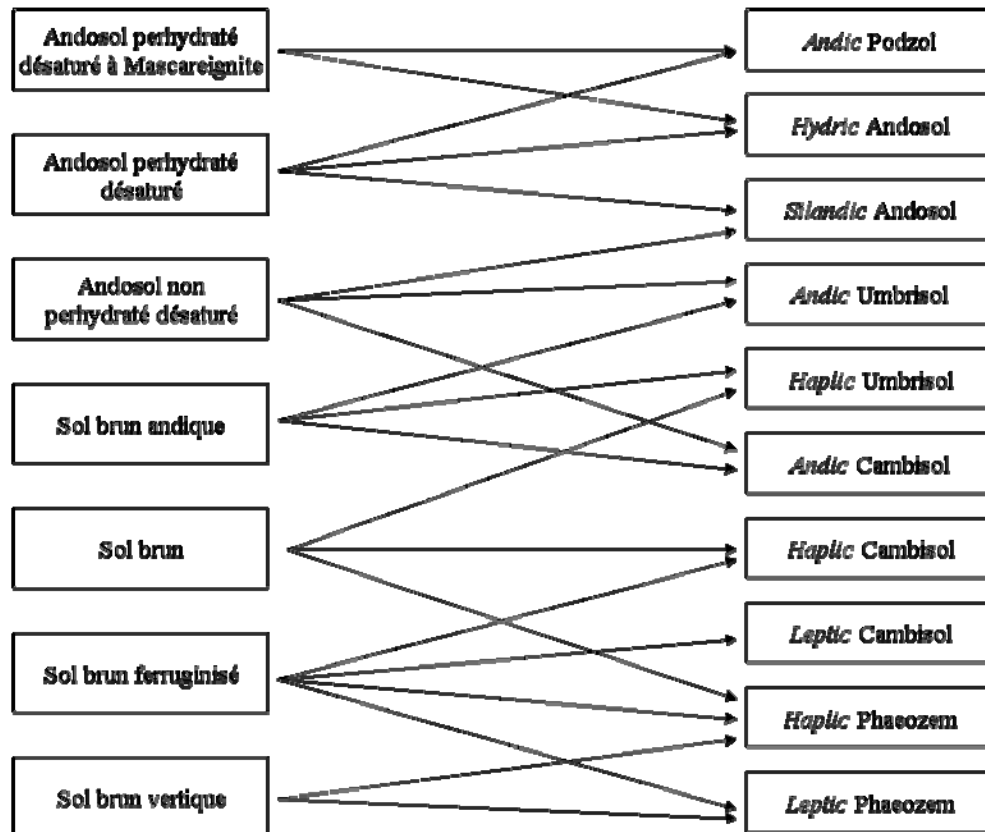
- UC2 : où le recouvrement cendreux épais comporte une couche de mascareignite (phytolithes) et a vu se développer un processus de podzolisation ; les sols sont des Podzols andiques.

- UC3 : où la podzolisation est absente et où les sols sont des Andosols perhydratés ou non, mais toujours épais et souvent lités.

### 3.2.3 *Les moyennes planèzes à topographie ondulée*

Les bossellements de l'unité précédente disparaissent avec l'amincissement du recouvrement cendreux et/ou la régularisation de sa surface par les processus de morphogenèse. Trois unités cartographiques ont été distinguées, de haut en bas :

Tableau 2 : correspondances établies sur notre secteur de référence entre la typologie utilisée par Raunet (1991) et celle utilisée dans nos travaux sur la base de la WRB.



– UC4 : il s'agit de la bande de terrain située immédiatement sous les Andosols de l'unité cartographique 3, le recouvrement cendreux y est mince, les couches de laves dures sont souvent présentes à la base de profils dont les horizons supérieurs ne présentent plus de propriétés andiques, la station du Cirad des Colimaçons est située au sein de cette unité cartographique, les sols sont des Cambisols andiques ou des Umbrisols (sols humifères) andiques.

– UC5 : en descendant encore un peu sur le versant, l'épaisseur du recouvrement cendreux diminue encore jusqu'à rendre ce recouvrement indentifiable ; les sols sont acides, humifères et épais, ils correspondent à des Umbrisols non andiques ou des Cambisols non andiques car même les horizons profonds ne présentent plus de caractères andiques.

– UC6 : correspond à des ressauts importants, vestiges d'anciens fronts de coulées, les sols n'y sont pas très différents de ceux de l'unité cartographiques précédente, sauf en ce qui concerne leur épaisseur ; il s'agit donc encore d'Umbrisols et de Cambisols, mais à caractère *leptic* (peu épais).

### 3.2.4 Les extrémités de planèzes à topographie ondulée

Ici la topographie (replats ou ressauts) et la nature de la roche mère (mugéarites de la phase IV ou hawaïtes de la phase III) on été croisées pour distinguer quatre unités cartographiques. Dans cette position sur le versant, le caractère humifère des sols reste bien marqué mais se combine à un caractère eutrophe (saturation en bases > 50 %) ; des Phaeozems se substituent donc aux Umbrisols :

– UC7 : zone de replats sur mugéarites (phase IV) ou sur tufs (phase II). Il s'agit de sols humifères, eutrophes, moyennement profonds.

- UC2. Cendres épaisses comportant un niveau sub-superficiel de mascareignite : Podzols andiques
- UC4. Zone haute à recouvrement cendreux d'épaisseur limitée : sols à propriétés andiques en profondeur sur pentes moyennes
- UC3. Cendres épaisses, souvent litées : andosols profonds, le plus souvent perhydratés
- UC6. Ressauts importants dus à d'anciens fronts de coulées : sols humifères acides, sur fortes pentes, épaisseur parfois limitée
- UC5. Zones médiane à recouvrement cendreux mince ou non identifiable : sols humifères acides, profonds, sur pentes moyennes
- UC1. Pavages de blocaille : sols peu profonds et affleurements
- UC9. Replats sur Hawaïtes (Phase III) : sols humifères, eutrophes, moyennement profonds
- UC7. Replats sur Mugéarites (Phase IV) ou sur tufs (Phase II) : sols humifères, eutrophes, moyennement profonds
- UC10. Ressauts (fronts de coulées) sur Hawaïtes (Phase III) : sols humifères, eutrophes, peu profonds ; affleurements
- UC8. Ressauts (fronts de coulées) sur Mugéarites (Phase IV) ou versants sur tufs (Phase II) : sols humifères, eutrophes, peu profonds, affleurements
- UC11. Alluvions : Fluvisols
- UC14. Ravines, cônes récents, falaises et blocailles
- UC12. Cordons littoraux
- UC13. Étang de Saint-Paul : sols hydromorphes

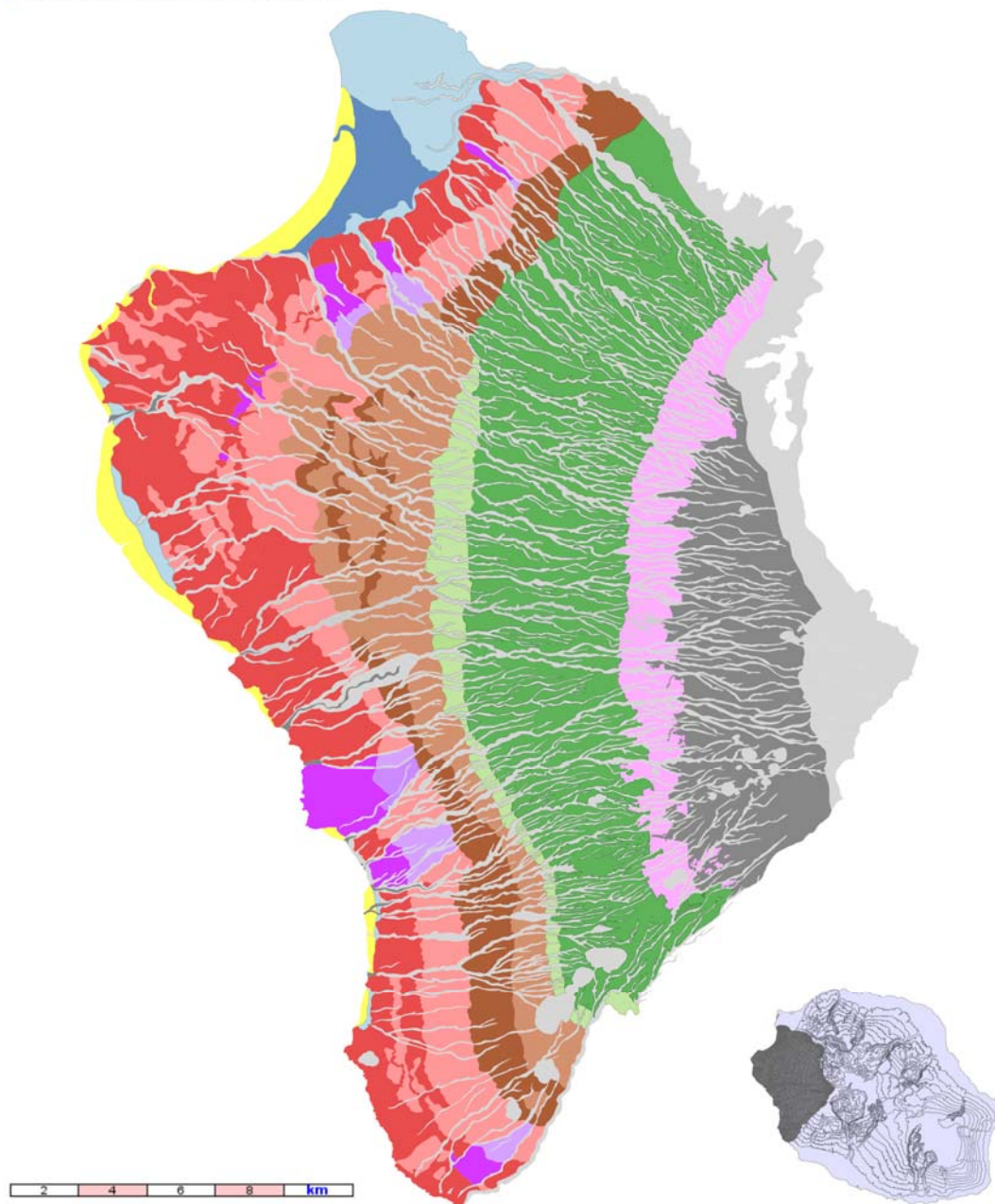


Figure 5 : carte des pédopaysages de la zone d'étude.

- UC8 : zone de ressauts (fronts de coulées) sur mugéarites (phase IV) ou versants sur tufs (phase II). Il s'agit de sols humifères, eutrophes, peu profonds et d'affleurements rocheux.
- UC9 : zone de replats sur hawaïtes (phase III). Les sols sont humifères, eutrophes et moyennement profonds.
- UC10 : zone de ressauts (fronts de coulées) sur Hawaïtes (phase III). Il s'agit de sols humifères, eutrophes, peu profonds et d'affleurements rocheux.

### 3.2.5 *Les unités cartographiques diverses*

Ces unités correspondent à des formes du relief particulières, d'extension limitée, où nous n'avons pas toujours ouvert de fosses ni fait de prélèvement. Les informations données sur leurs extensions sont issues de études précédentes (Raunet, 1991).

- UC11 : alluvions d'origine fluviale ; il s'agit de Fluvisols.
- UC12 : cordons littoraux.
- UC13 : étang de Saint-Paul ; il s'agit essentiellement de sols hydromorphes.
- UC14 : ravines et cônes volcaniques récents.

## 3.3 Évaluation des temps de transfert de l'eau à l'aide du traçage isotopique

### 3.3.1 *But et principes généraux de ces études*

Dans la majorité des sols, l'eau est contenue essentiellement dans la porosité. L'étude de ses mouvements s'appuie donc sur les variations de son état énergétique (son potentiel hydrique) et de sa teneur dans le milieu. Toutefois, certains types de sols, en particulier les Andosols, ne répondent pas exactement à ce schéma (Perret, 1994). Notre carte des pédopaysages (figure 5) montre qu'ils occupent une part importante de la zone d'étude. Les deux principales raisons tiennent (i) à la connectivité de la porosité et (ii) à l'hydratation de certains minéraux.

Concernant le premier point, pour qu'il y ait circulation de l'eau dans un sol, celle-ci doit emprunter un chemin qui lui est dicté essentiellement par des pores connectés entre eux. Si de l'eau est emprisonnée et immobilisée dans un espace poral, elle n'intervient pas dans les transferts hydriques. Le second point est assez proche. Les Andosols contiennent des minéraux mal cristallisés présentant des surfaces spécifiques très importantes. De plus, ces minéraux sont hydratés et cette eau de constitution ne participe pas, elle non plus, aux transferts.

Il existe très peu de méthodes permettant de distinguer et quantifier la fraction de l'eau participant réellement aux transferts. Le sol étant un milieu très réactif, tout élément circulant avec l'eau est susceptible d'interagir et d'être retenu dans des proportions variables. C'est pourquoi nous avons utilisé les isotopes stables de l'hydrogène de l'eau. L'expérimentation a consisté à injecter, en surface, une eau présentant une signature isotopique en deutérium significativement différente de celle des eaux du sol ; le deutérium étant un des constituants de la molécule d'eau, il se comporte de la même façon que celle-ci. L'eau injectée contient également une forte concentration en nitrate, ceci afin de mesurer les vitesses de transfert d'un polluant potentiel de nature anionique, réactif avec la plupart des sols de notre zone d'étude mais de façon variable. Ensuite, nous avons recueilli et analysé les eaux qui ont percolé sous un volume de sol donné et ce, pour trois sites d'études.

### 3.3.2 *Choix des sites de mesure*

Nous avons choisi d'effectuer nos mesures en trois endroits différents. Ces trois sites sont situés sur la toposéquence (Olivier, 2005), passant par la station du Cirad des Colimaçons en suivant la ligne de plus grande pente (figure 6).



Nous avons travaillé à chaque fois sur l'horizon de surface de 0 à 40 cm sauf pour le site P1110 où nous avons effectué des mesures que de 0 à 30 cm de profondeur. Pour le site P800, situé au sein de la station du Cirad des Colimaçons), nous avons travaillé aussi sur l'horizon de sub-surface entre 40 et 80 cm de profondeur. Nous avons donc trois sites d'étude, donc trois profils, mais quatre horizons pédologiques différents.

### 3.3.3 Calcul des concentrations en traceurs

#### 3.3.3.1 Dilution des isotopes

Nous avons dilué 1 litre d'eau enrichie en deutérium à 99,8 % dans 49 litres d'eau de pluie à 9 ‰ en deutérium. L'enrichissement de l'eau de pluie a été déterminé lors d'analyses préliminaires.

Nous avons choisi le deutérium par rapport à l'oxygène 18 car les propriétés de ces deux traceurs sont identiques mais le deutérium présente un coût nettement plus intéressant. Les calculs de dilution sont les suivants :

$\delta$  standard = 0 ‰ en deutérium (D) ou 155,76 ppm puisque c'est l'abondance du deutérium dans l'échantillon de référence VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

$$\delta = \frac{R_{ech}}{R_{st}} - 1 \text{ avec } R_{ech} = \text{quantité de D/H en ppm dans l'échantillon et}$$

$$R_{st} = \text{quantité de D/H en ppm dans le standard}$$

Donc  $R_{ech} = (\delta + 1) \times R_{st}$

Pour l'eau de dilution on a  $R_{dil} = 155,76 \times (1 + 0,009) = 157,16$  ppm de deutérium.

Pour l'eau enrichie on a  $R_{en} = 0,998$  ppm de deutérium.

Donc en diluant 1 litre d'eau enrichie à 99,8 % avec 49 litres d'eau de pluie à 9 ‰, on a :

$$R_{ech} = \frac{R_{dil} + 49 \times R_{en}}{(1 - R_{dil}) + 49 \times (1 - R_{en})} \times 10^6 \rightarrow R_{ech} = \frac{0,998 + 49 \times 0,00015716}{0,02 + 49 \times 0,9998428} \times 10^6 \rightarrow R_{ech} = 20119,5 \text{ ppm}$$

La valeur de delta est alors :  $\delta = \frac{R_{ech}}{R_{st}} - 1$  soit  $\delta = \left( \frac{20119,5}{155,79} - 1 \right) \times 1000 = 128169,9$  ‰ en deutérium par rapport au VSMOW.

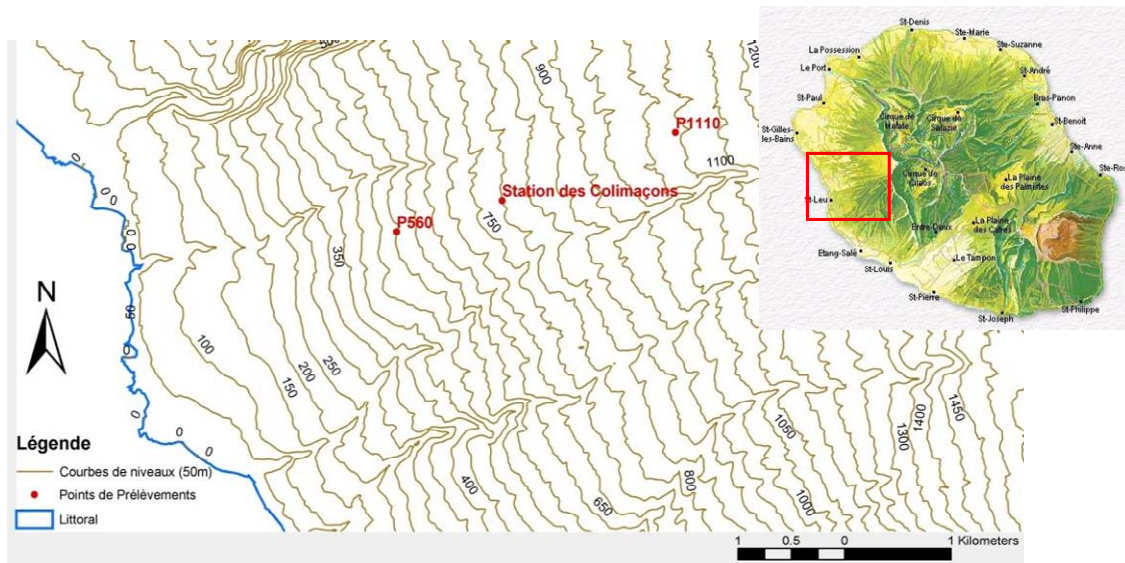


Figure 6 : localisation des trois sites expérimentaux.

On obtient une eau enrichie à 128 170 ‰, ce qui doit nous permettre de différencier facilement l'eau enrichie de l'eau du sol puisque l'eau du sol a un signal isotopique en D de l'ordre de 5 ‰.

### 3.3.3.2 Concentration en nitrates

Nous avons choisi de faire un apport d'azote équivalent à 2000 unités d'azote par hectare. En effet, afin d'être sûr de voir clairement le pic de nitrates, nous avons choisi de faire un apport très important.  $2000 \text{ unité d'N.ha}^{-1} = 2000 \text{ kg d'N.ha}^{-1} = 0,2 \text{ kg d'N.m}^{-2}$

Le nitrate que nous apportons est sous forme de sel de calcium :  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4 \text{ H}_2\text{O}$ .

La surface sur laquelle les nitrates sont injectés est de  $0,0706 \text{ m}^2$  ce qui correspond à 14,13 g d'azote. Il faut donc 118 g de  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2, 4 \text{ H}_2\text{O}$  pour la surface que nous utilisons.

### 3.3.4 Mesures in situ

Le protocole des mesures de terrain que nous avons réalisées est le suivant. Nous avons préalablement saturé en eau le volume de sol sur une profondeur suffisante, puis nous avons injecté l'eau marquée, enrichie en deutérium et en nitrates. Nous avons effectué des prélèvements à 40 cm de profondeur de l'eau drainante. Pour saturer la portion de sol qui nous intéresse et pour réaliser nos mesures nous nous sommes servi d'un dispositif double anneau. Le grand anneau fait 130 cm de diamètre et le petit 30 cm (figure 7).

La première étape consistait donc à saturer le sol en eau. Pour cela, nous avons rempli les deux anneaux d'eau et suivi la variation de hauteur d'eau au cours du temps dans le cylindre central jusqu'à ce que cette variation soit constante ou varie très peu (conductivité hydraulique à saturation). L'anneau extérieur est là pour contraindre les écoulements dans le cylindre central à être verticaux.

La deuxième étape consiste à creuser une petite fosse verticale à la périphérie de l'anneau extérieur puis une cavité horizontale permettant de placer un préleveur d'eau (figure 7) à l'aplomb de l'anneau central et ainsi de prélever la solution du sol s'écoulant dans le volume de sol (figure 8). Le préleveur est constitué d'une simple boîte en plastique rigide équipée d'un capillaire qui sera relié à une pompe et fermée sur le dessus par un géotextile résistant au déchirement mais non interactif chimiquement avec les eaux (bidim®), ce que montre la figure 7. Le géotextile permet une filtration sommaire de l'eau que l'on prélève et ainsi de ne pas récupérer de l'eau trop boueuse.

Après avoir saturé en eau le volume de sol et creusé la cavité, nous avons injecté l'équivalent d'un demi-volume théorique de pores d'eau enrichie en deutérium ainsi qu'une quantité de nitrate équivalente à un apport de 2000 unités d'azote par hectare. Nous avons ensuite prélevé l'eau percolant sous l'anneau central.

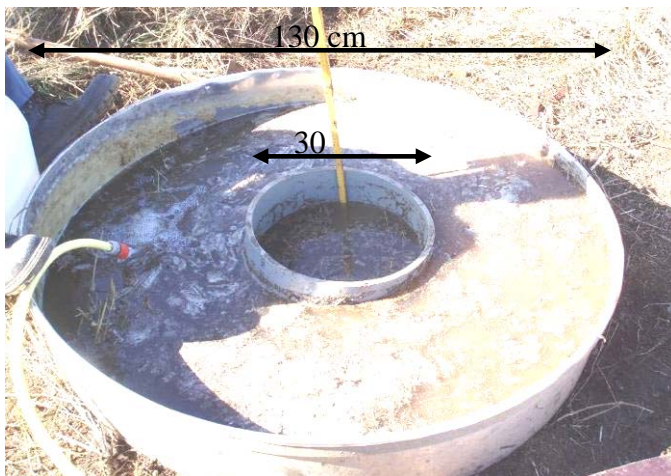


Figure 7 : dispositif double anneaux à gauche et préleveur d'eau à droite.



Les prélèvements ont été effectués grâce à une pompe permettant de récupérer l'eau qui gouttait dans le préleveur. La fréquence des prélèvements dépendait de la conductivité hydraulique de chaque site. Les prélèvements étaient transférés dans une fiole (figure 8) et effectués de façon à recueillir environ 40 ml de solution à chaque fois. En effet, 30 ml de solution étaient nécessaires au dosage des isotopes, ils ont été conditionnés dans des flacons de verre ambré. Par ailleurs, les 10 ml nécessaires au dosage des nitrates étaient stockés dans des venojects. Tous les échantillons ont été filtrés à 0,45 microns immédiatement sur le terrain et stockés dans une glacière, puis au frais à 5°C avant d'être analysés. Sur le site P1110 (Andosol), la conductivité hydraulique étant très faible, de l'ordre de 60 mm.h<sup>-1</sup>, il fallait environ quinze minutes pour récupérer le volume de solution qui nous intéresse alors que sur le site P560 (Phaeozem) la conductivité hydraulique étant plus importante, environ 300 mm.h<sup>-1</sup>, nous avons pu effectuer un prélèvement toutes les quatre-vingt dix secondes.

Les échantillons servant au dosage des isotopes ont été envoyés pour analyse au laboratoire GNS Science en Nouvelle-Zélande. Le deutérium a été analysé en utilisant un système d'équilibration automatique de l'eau, WES, couplé à un spectromètre de masse GEO 20-20 à double entrée de gaz (PDZ Europa Ltd. U.K.).

Les analyses de nitrates ont été faites par chromatographie ionique Dionex DX100 à l'université de la Réunion au sein du laboratoire des sciences de la terre (LSTUR). Son principe repose sur les propriétés des résines échangeuses d'ions qui fixent sélectivement les anions ou les cations présents dans la solution.

### 3.3.5 Résultats et discussion des analyses de nitrates et d'isotopes

Les courbes d'élution ont été tracées en portant en abscisse l'eau injecté exprimée en pourcentage du volume de pore occupé, calculés sur la base des mesures de conductivité hydraulique effectuées tout au long de la manipulation pour chaque sol. En réalisant cette conversion, nous obtenons ainsi des résultats qui seront comparables entre eux d'un site à l'autre.

En ordonnées sont portées les concentrations obtenues (en nitrates et en isotopes) rapportées à la concentration de la solution que l'on a injectée en entrée sur le sol ( $C/C_0$ ). L'échelle en ordonnée est donc sans dimension afin de pouvoir également comparer les sites entre eux.

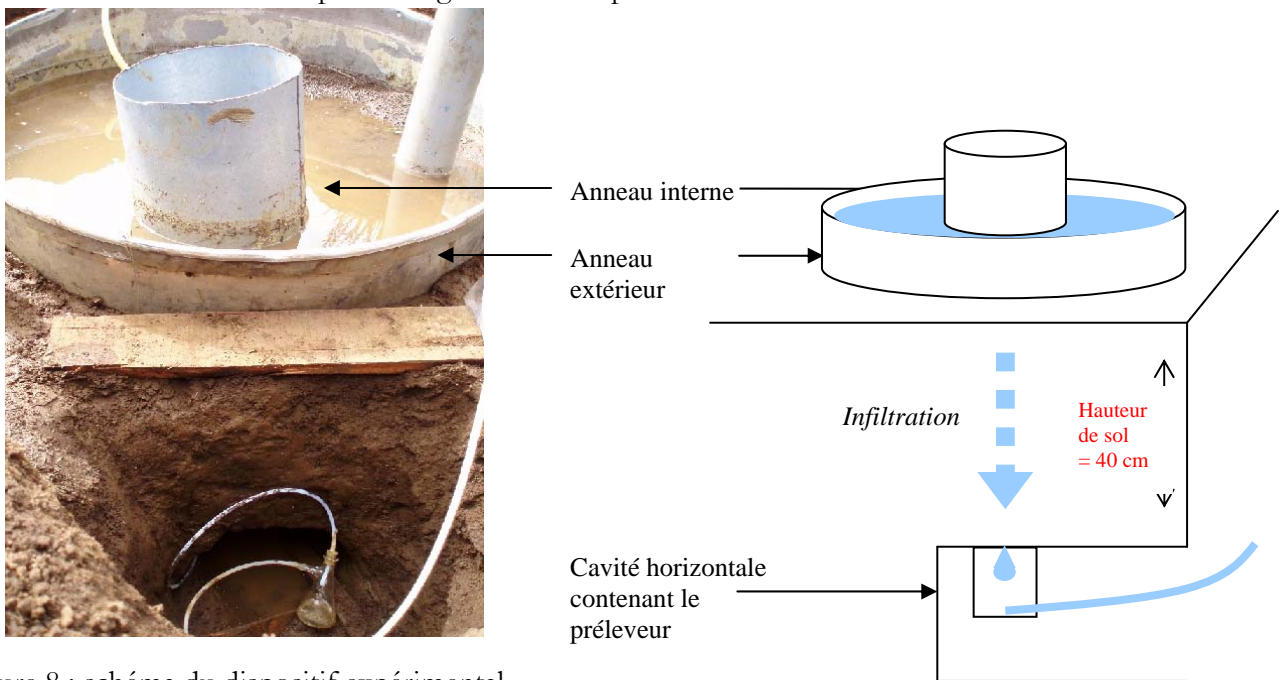


Figure 8 : schéma du dispositif expérimental.

Le point d'origine des courbes d'élution correspond au moment de l'injection des traceurs alors que le sommet des courbes d'élutions correspond au milieu du créneau d'injection des traceurs comme le montre la figure 9. C'est pourquoi dans le tableau 3, nous avons soustrait 25 % de volume de pores aux maxima d'injection puisque le créneau que nous avons injecté correspondait à 50 % de volume de pore.

Selon la figure 9, la présence d'eau immobile n'induit pas de changement dans le bilan de masse mais un rapport  $C/C_0$  plus faible, une courbe de percée qui débute plus tôt et qui finit plus tard ainsi qu'une asymétrie plus marquée. Cependant, cela n'est valable théoriquement que dans le cas des isotopes. Pour les nitrates, il faut aussi tenir compte de phénomènes d'adsorption / désorption et d'exclusion anionique.

La courbe d'élution des nitrates (figure 10) pour le sol P800 H1 est la première à sortir à 30,4 % du volume de pore et à 0,314 de  $C/C_0$ , ce qui est l'intensité maximum obtenue toutes courbes confondues (tableau 3). Le second pic d'élution est celui de CM800 H2 à 60,8 % du volume de pore mais l'intensité du rapport  $C/C_0$  est seulement de 0,139, ce qui est l'intensité minimum.

Pour le sol AN 1110, la courbe d'élution sort à 72,3 % du volume de pore avec une intensité de 0,197. Et enfin, le dernier pic à sortir est celui de PH 560 à 82 % du volume de pore avec une intensité de 0,243.

Afin de vérifier la conservation du bilan de masse, nous avons calculé la quantité de nitrates et de deutérium élués en intégrant l'aire sous la courbe entre chaque point par la méthode des trapèzes. Pour cela, nous avons assimilé la courbe entre deux points à un segment, la surface entre ces points et l'axe des abscisses est donc un trapèze. Pour calculer l'aire que l'on est susceptible d'avoir si l'on poursuit l'expérimentation jusqu'à avoir une conductivité électrique équivalente à celle d'entrée, nous avons extrapolé linéairement la fin des courbes d'élutions.

Comme le montre la figure 11, toutes les courbes d'élution sont fortement asymétriques et indiquent bien la présence d'eau immobile. D'après ces courbes d'élution, les courbes de percée des nitrates et des isotopes sortent rigoureusement en même temps pour P800 H1 et P800 H2 (tableau 3). On peut en déduire que s'il existe des phénomènes d'adsorption/désorption, ils ne prédominent pas dans les deux horizons de ce Cambisol. En effet, la capacité d'échange anionique dans le cas de ces sols, est assez faible.

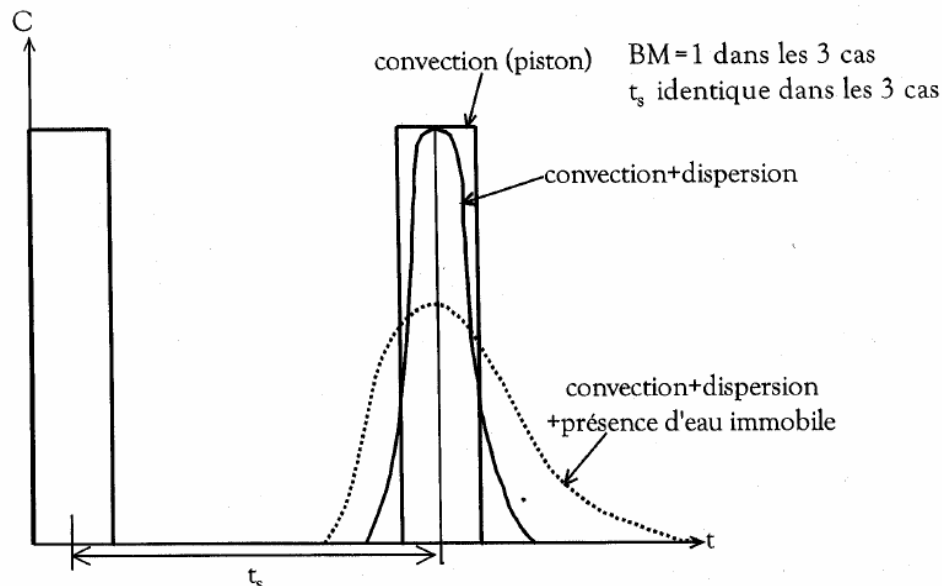


Figure 9 : courbes de percée obtenues pour différents types d'écoulement avec un traceur non interactif (BM= bilan de masse ;  $t_s$ =temps de séjour du soluté ; repris de Pallud, 2000).

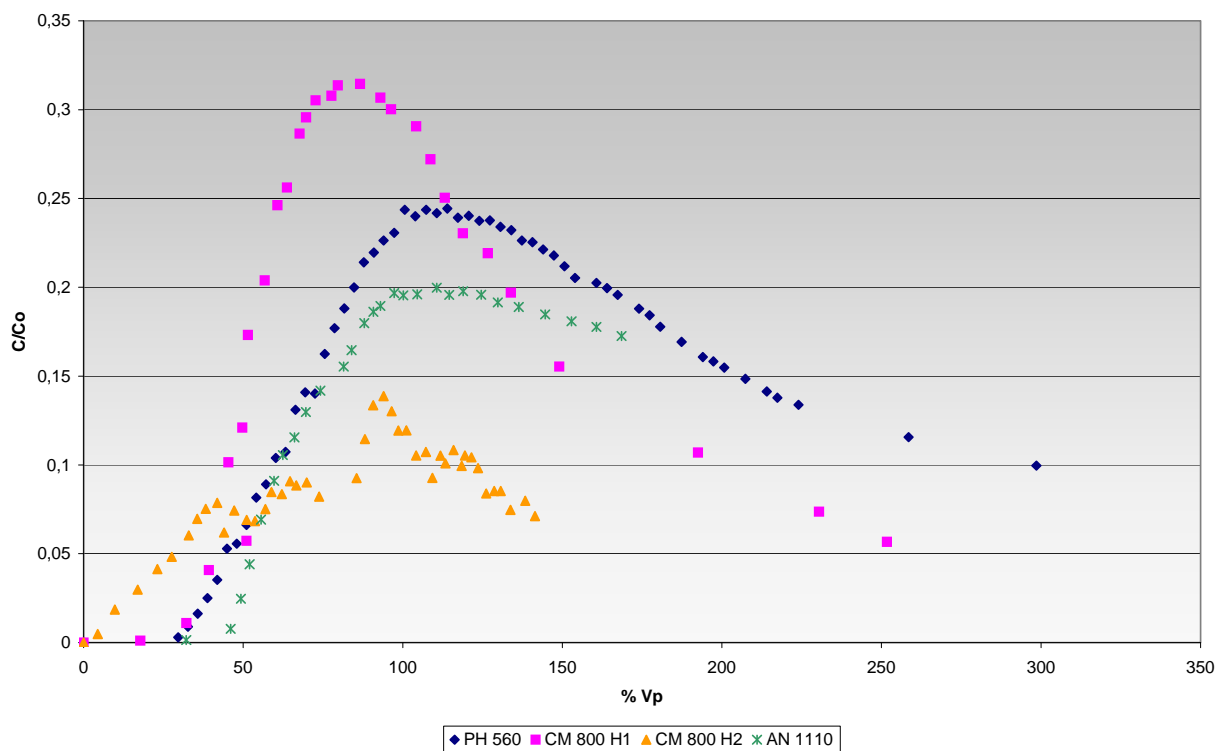


Figure 10 : courbes d'élution des nitrates pour les quatre sites.

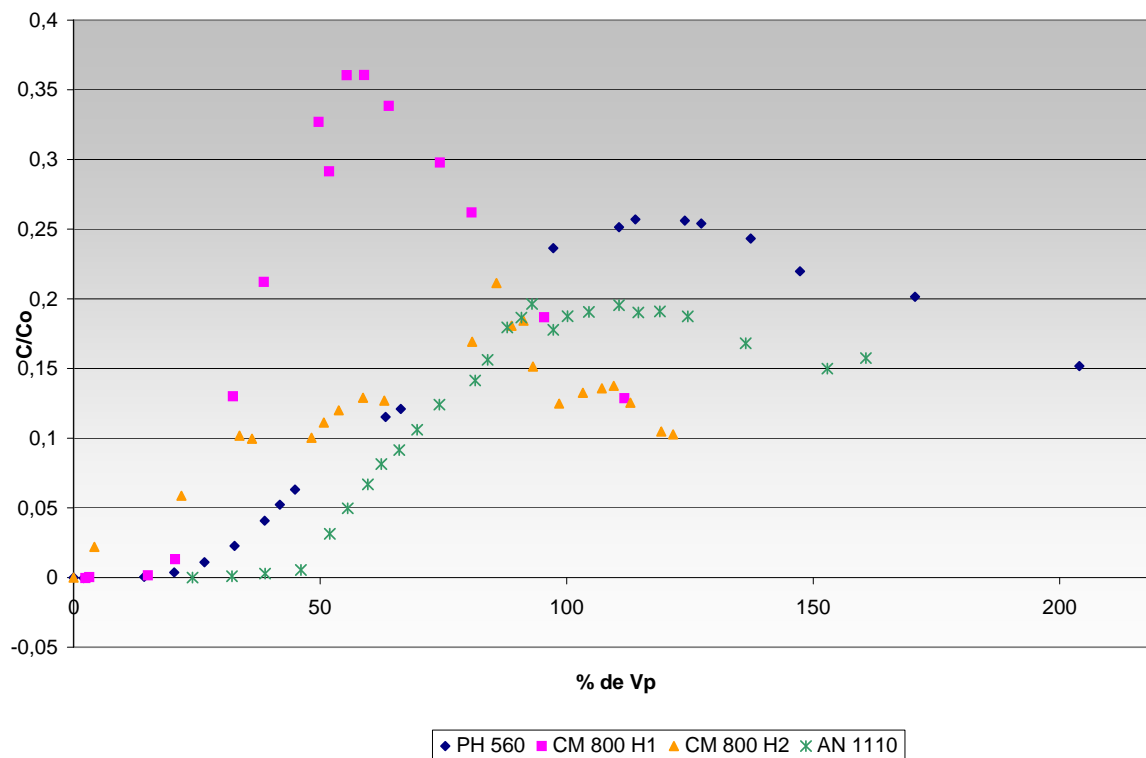


Figure 11 : courbes d'élution des isotopes pour les quatre sites.

Tableau 3 : valeurs remarquables des courbes d'élution.

	Max d'élution NO <sub>3</sub> (%Vp ; C/C <sub>0</sub> )	Max d'élution Isotope (%Vp ; C/C <sub>0</sub> )	Dernier point NO <sub>3</sub> (%Vp ; C/C <sub>0</sub> )	Bilan massique NO <sub>3</sub>	Quantité NO <sub>3</sub> extrapolée	Bilan massique isotopes	Quantité isotopes extrapolée
PH 560	82 ; 0,243	94 ; 0,256	285; 0,09	49,9g 80,5%	95,4%	62,6%	80%
CM 800 H1	30,4 ; 0,314	30,4 ; 0,360	179,5; 0,057	41,2g 66,4%	69,3%	41,6%	45,2%
CM 800 H2	60,8 ; 0,139	60,75 ; 0,21	133,6; 0,061	14,1g 22,7%	25,8%	26,9%	39,4%
AN 1110	72,3 ; 0,197	67,9 ; 0,196	168; 0,172	24,6g 39,7%	93,5%	33,60%	61%

Dans le cas de l'Andosol (P1110), la courbe d'élution des nitrates est décalée vers la droite par rapport à celle des isotopes, c'est à dire qu'elle est retardée. Nous pouvons donc penser que dans ce sol les phénomènes d'adsorption/désorption prédominent. La CEA de ce sol est forte et varie de 0,76 cmol.kg<sup>-1</sup> à 5 cm de profondeur à 1,02 cmol.kg<sup>-1</sup> à 25 cm de profondeur.

Au contraire, dans le cas de P560 (Phaeozem), la courbe des nitrates sort avant la courbe des isotopes. Nous pouvons donc penser qu'un phénomène de type « exclusion anionique », donc autre que le phénomène d'adsorption, prédomine ici.

### 3.3.6 Conclusions de cette expérimentation

Tout d'abord, la méthode expérimentale mise en place, bien que complexe et lourde, semble très réaliste au vu des formes des courbes de percée que nous obtenons. Ensuite, en regardant les résultats obtenus, nous remarquons que les quatre horizons des trois sites présentent des comportements très différents vis à vis des transferts d'eau et de soluté, et vis à vis des processus d'adsorption/désorption. Ceci justifie donc la mise en place de cette expérimentation sur ces trois sites. Ces résultats nous permettront donc de pondérer et différencier la capacité de ces trois types de sols à transférer les polluants vers les nappes phréatiques.

## 4 VULNÉRABILITÉ AU TRANSFERT DE POLLUANTS VERS LA NAPPE

### 4.1 Les grandes méthodes de modélisation

#### 4.1.1 *Les méthodes de simulation mécanistes*

Elles sont issues des modèles à base physique et hydrodynamique (*e.g.* Hydrus, Wave, Swat, Stics). Par exemple, le modèle de simulation dit à « réservoirs » Swat (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle qui représente les processus selon des lois physiques (Laurent et Rossignol, 2004 ; Bioteau *et al.*, 2002). Ce modèle est conçu pour intégrer le rôle du milieu et des activités agricoles par une représentation assez fine des itinéraires techniques et des propriétés des sols. Il s'agit d'une représentation des écoulements vers la nappe par un modèle simple à « réservoirs » avec des paramètres calibrés. C'est un modèle semi-distribué qui estime les flux d'eau, de nutriments, de pesticides, et de sédiments dans la zone racinaire, dans la nappe et dans les cours d'eau (Bioteau, *et al.*, 2002). Ce modèle, très utilisé aux États-Unis pour les problématiques d'érosion, peut fournir en sortie une estimation des fuites de polluants vers la nappe (en kg/ha/an) pour les nitrates et les phosphates.

Toutefois, les modèles mécanistes de ce type ne conviennent pas aux données dont nous disposons ; ils ne sont pas du tout adaptés à l'application aux échelles auxquelles nous travaillons. Par ailleurs, le résultat final donne plutôt une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe. Ces modèles se basent sur un type de polluant pour chaque modélisation.

#### 4.1.2 *Les méthodes statistiques*

Elles sont basées sur une variable qui dépend de la concentration en contaminant ou d'une probabilité de contamination. Elles donnent également une image de la vulnérabilité spécifique de la nappe, puisqu'elles sont spécifiques d'un type de polluant. Cependant, elles peuvent être utiles pour la mise en place des modèles à indexation (*cf.* ci-dessous). En effet, ces modèles sont basés sur une hiérarchisation de variables par des poids et il existe des tests statistiques qui fournissent une estimation des poids que l'on peut donner à chacune des variables (exemple de la régression logistique). Ce type de test fournit une information sur la probabilité d'occurrence d'une pollution (résultats binaire : 0 ou 1). Cela se traduit par la fonction suivante :

$P(X=1) = F(x_i)$ , avec  $P(X=1)$ , la probabilité d'occurrence d'une pollution et les  $x_i$  étant l'ensemble des variables qui caractérisent la pollution (par exemple texture, structure, taux de MO... dans notre cas d'étude). Les résultats de la régression fournissent une estimation du poids de chaque variable, l'importance de chaque variable dans la probabilité d'occurrence d'une pollution.

L'utilisation de ces méthodes est donc intéressante dans le sens où si, combinées à des méthodes d'indexation, elles permettent de lever les problèmes liés à la subjectivité de ces méthodes.

#### 4.1.3 *Les méthodes de cartographie à index*

Elles sont basées sur la combinaison de cartes de divers paramètres d'une région (paramètres = critères de vulnérabilité), en donnant un index numérique ou une valeur à chaque paramètre. La combinaison des cartes se fait au moyen de logiciels de traitement multicritères (type « système d'information géographique »). Il existe deux principales approches : la méthode des systèmes hiérarchisés et la méthode des systèmes paramétrés.

#### 4.1.3.1 La méthode des systèmes hiérarchisés

Cette méthode est basée sur la comparaison d'une zone donnée avec les critères représentant les conditions de vulnérabilité d'autres zones. Elle est généralement utilisée pour évaluer la vulnérabilité de contextes hydrogéologiques variés à moyenne ou grande échelle.

Par exemple, les modèles hiérarchisés dits à « arbre de décision » sont souvent utilisés. Ils ne fournissent pas comme résultat final une décision, c'est l'utilisateur ou l'expert qui prend les décisions. L'arbre de décision ne nous propose que des situations à risque, à classer les unes par rapport aux autres.

La construction de l'arbre se fait en deux temps :

- phase de construction de l'arbre ;
- phase de décision : classement et définition du risque par dire d'expert.

La première phase n'est en rien une phase de décision mais une phase qui permet de distinguer des situations les unes des autres en utilisant un arbre. En fait, il serait plus correct d'appeler cette phase « phase de distinction ». Les arbres utilisés sont souvent des arbres binaires ; il s'agit alors d'arbres dichotomiques. Mais on peut utiliser aussi des arbres ternaires ou n-aires.

La figure 12 présente un arbre binaire où « o » est la modalité favorable et « d » la modalité défavorable (les critères sont hiérarchisés) : l'arbre nous fournit ainsi, une suite de situation qu'il s'agit de classer les unes par rapport aux autres. A priori, il semble simple de classer de la façon suivante (de la gravité la plus forte à la plus faible) :

ddd > ddo > dod > doo ??? odd > odo > ood > ooo

Pour un tel arbre, il existe donc deux solutions de classification des situations à risque. Sur les arbres binaires comme celui de l'exemple, le nombre de situations fournit par l'arbre est égal à  $2^n$  solutions,  $n$  étant le nombre de critères dans l'arbre. On voit déjà qu'avec trois clés de détermination il y a déjà des difficultés à classer les situations. Aurousseau (1999) estima qu'à partir de  $n = 5$  ou plus, il devient impossible même au meilleur des experts de différencier toutes les situations.

La technique des arbres de décisions doit être manipulée avec beaucoup de précaution. Cependant, elle est applicable lorsque le nombre de situations qui sort de l'arbre est très inférieur à une vingtaine de situations.

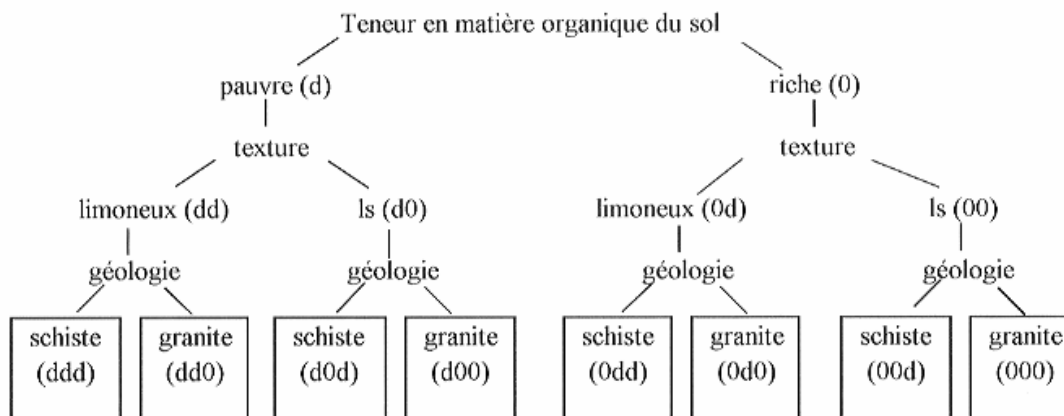


Figure 12 : schéma d'application de la méthode des arbres de décisions où « o » est la modalité favorable et « d » la modalité défavorable.

#### 4.1.3.2 La méthode des systèmes paramétrés

Cette méthode repose sur la sélection de paramètres considérés comme représentatifs pour estimer la vulnérabilité d'une zone souterraine. Chaque critère a une gamme de variation naturelle définie qui est subdivisée en intervalles discrétisés et hiérarchisés. Un index est attribué à chaque intervalle, reflétant le degré de sensibilité relatif à une contamination. En poussant un peu plus loin l'analyse, cette méthode ne prend pas en compte l'importance d'un critère par rapport à un autre vis-à-vis de la vulnérabilité.

#### 4.1.4 Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères

Elles sont les plus pertinentes vis-à-vis de la réalité terrain du fait de la prise en compte de l'importance relative de chaque critère par rapport à la vulnérabilité globale de la nappe.

D'un point de vue général toutes les méthodes se traduisent de la manière suivante :

$$V = \sum_{i=1}^n \alpha_i \times X_i$$

où V est une quantification relative de la vulnérabilité,  $\alpha_i$  est la pondération liée au critère  $X_i$ , et  $X_i$  un critère pris en compte pour cette évaluation.

Il existe également un certain nombre de modèles dérivés de la méthode Drastic (Aller *et al.*, 1987). Même si ce modèle a déjà été très largement exploité et modifié depuis sa conception, il nécessite tout de même quelques adaptations pour qu'il soit parfaitement utilisable pour notre problème et faire de la partie sol, la part la plus importante du modèle.

#### 4.1.5 Les autres outils de modélisation : exemple de la méthode Siris

Le problème rencontré dans les modèles à indexation est la hiérarchisation et surtout la pondération des différents critères. Certains modèles permettent de lever le problème de la pondération, ne nécessitant simplement que la résolution de la hiérarchisation des critères à prendre en compte. C'est le cas de la méthode Siris (système d'intégration des risques par interaction des scores).

La méthode Siris proposée par Vaillant *et al.* (1995) et utilisée ultérieurement (Aurousseau, 1999 ; Aurousseau *et al.*, 1998) est une méthode hiérarchique qui ne nécessite pas la définition des gravités des facteurs mais seulement leur classement hiérarchique du plus grave au moins grave. Elle met en fait en œuvre des règles (auto-pénalisation, etc.) qui ne sont pas très évidentes à expliciter. La méthode Siris est un outil d'aide à la décision pour le classement de situation à risque les unes par rapport aux autres (Guerbet et Jouany., 2002). Cette méthode est également appliquée afin de représenter la potentialité des substances phytosanitaires à se retrouver dans les eaux de surface ou les eaux souterraines : <http://www.ineris.fr/siris-pesticides/>

Il y a deux étapes préparatoires incontournables :

- sélection des variables à prendre en compte ;
- classification hiérarchique des critères en fonction de l'objectif de l'étude.

Cette méthode met en œuvre un ensemble de règles d'agrégation. Les règles d'agrégation constituent une solution pour tous les cas ambigus de combinaisons de modalités comme dans les exemples que nous avons vus plus haut : (d00) ? (0dd) ou encore (0dd00) ? (0d0dd) ou (0d000) ? (00ddd) ou (00d00) ? (000dd).

La méthode Siris est une méthode par pénalisation, de type hiérarchique (la pénalité de doo est toujours supérieure à celle de odo, elle même supérieure à celle de ood). De même, moo > omo > oom (tableau 4). Les modalités de chaque critère sont toujours classées dans le même ordre :

« o » favorable, « m » intermédiaire, « d » défavorable. Dans le cas de facteurs à deux modalités; elles sont notées « o » et « d ». Dans le cas de facteurs à trois modalités (tableau 5), elles sont notées : « o », « m », « d ». Chaque critère n'a pas une importance égale vis-à-vis de la décision définitive (dans notre

Tableau 4 : illustration de la règle d'interaction (Aurousseau, 1999).

Facteur 1	Etape	Facteur 2	Interaction	Etape	Facteur 3	Interaction	Etape		Rang SIRIS
o = 0		o = 0 d = 4 o = 0		7	o = 0	+i = 1	1	ooo	0
					d = 2			ood	2
					o = 0			odo	5
					d = 3		2	odd	7
					o = 0			doo	6
d = 6	6	d = 5	+i = 1	5	d = 3	+i = 1	3	dod	9
					o = 0			ddo	11
					d = 4		4	ddd	15

cas, la décision est de dire si telle zone est vulnérable ou ne l'est pas), il est donc nécessaire de hiérarchiser les critères. Deux autres modalités notées « md » et « 2d » sont considérées dans le cas où deux facteurs à trois modalités ont le même niveau hiérarchique.

Il y a deux principales règles d'agrégation pour construire le modèle :

- 1 la règle d'interaction : les valeurs des pénalités attribuées aux différentes modalités (sauf pour « o » qui se voit toujours attribuer la pénalité nulle) dépendent de la situation des classes précédentes (des facteurs de risque hiérarchiquement plus importants). En effet, lorsque la situation s'aggrave dans la classe (n), la pénalité attribuée à une modalité donnée de la classe (n+1) augmente (illustré par le tableau 4).
- 2 la règle de dissymétrie : elle concerne l'attribution de la pénalité à la modalité « m ». On a  $m = E(d/2)$  où E correspond à la partie entière. Donc  $m = d/2$  si d est pair et  $m = (d - 1)/2$  si d est impair. Cette dissymétrie a une limitation : la pénalité attribuée à « m » doit rester supérieure à la plus haute pénalité attribuée à « m » pour le facteur suivant illustré par le tableau 5).

Dans ce cas, ce sont des critères à deux modalités. On donne toujours la valeur « 2 » à la modalité défavorable du dernier critère (qui est le moins important d'un point de vue hiérarchique). On augmente la modalité défavorable de + 1 (du facteur 3 lorsque l'on passe à la modalité défavorable du facteur 2 (de ood à odd, la situation s'aggrave) et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on donne une valeur à la modalité défavorable du facteur 1. Ensuite, pour connaître le rang Siris de chaque situation, il suffit d'agréger les valeurs. Ainsi, on résout le problème par exemple de savoir quelle situation est plus à risque odd ou doo > odd > doo.

On commence toujours par la valeur 2 à la modalité défavorable du facteur 3. On applique d'abord les règles d'interactions afin de déterminer les valeurs des autres modalités défavorables pour les autres facteurs. Une fois cette étape terminée, il suffit d'appliquer la règle de dissymétrie pour connaître les valeurs des modalités intermédiaires (« m »).

Comme dans l'exemple, on termine en faisant une agrégation des différentes modalités pour chaque situation afin de connaître le rang Siris de chaque situation.

Ce genre de modèle présente un certain nombre d'intérêts par rapport aux autres modèles présentés ci-dessus :

- prend en compte une hiérarchisation des facteurs mais sans leur donner un poids ;
- permet de distinguer un grand nombre de situation à risque très diverses (grâce à la valeur du rang SIRIS) ;
- relativement facile à mettre en place, et utilisable pour n'importe quelle autre situation géographique ;
- possibilité de travailler à l'échelle du pixel, de la parcelle ; valable pour n'importe quel type de polluant.



Tableau 5 : illustration de la combinaison des deux règles « interaction et dissymétrie » (Aurousseau, 1999).

Facteur 1	Numéro d'étape	Facteur 2	Inter action	Numéro d'étape	Facteur 3	Inter action	Numéro d'étape	Numéro d'exemple cité dans le texte		Rang SIRIS			
o = 0		o = 0		24	o = 0	i = 1	1	ex 1	ooo	0			
					m = 1				oom	1			
					d = 2				ood	2			
					o = 0				omo	2			
		m = 2		13	m = 1	i = 1	14	ex 2	omm	3			
					d = 3				omd	5			
					o = 0				odo	5			
		d = 5		23	m = 2	i = 1	15	ex 3	odm	7			
					d = 4				odd	9			
					o = 0				moo	4			
m = 4	25	o = 0			m = 1	i = 1	16	ex 4	mom	5			
					d = 3				mod	7			
					o = 0				mno	7			
		m = 3	i = 1	12	m = 2	i = 1	17	ex 6	mmm	9			
					d = 4				mmd	11			
					o = 0				mno	10			
		d = 6	i = 1	22	m = 2	i = 1	18	ex 7	mdm	12			
					d = 5				mdd	15			
					o = 0				doo	8			
		o = 0		10	m = 2	i = 1	19	ex 5	dom	10			
d = 8	11				d = 4				dod	12			
					o = 0				dmo	11			
	m = 3	i = 1	21	m = 2	i = 1	20			dmm	13			
				d = 5					dmd	16			
				o = 0					ddo	15			
	d = 7	i = 2	10	m = 3	i = 2	21			ddm	18			
				d = 6					ddd	21			

## 4.2 Choix de la méthode de modélisation

Les méthodes de simulation mécanistique des phénomènes ne sont pas adaptées à notre étude pour plusieurs raisons. L'échelle à laquelle nous travaillons dans ce projet est l'échelle régionale. Or ces modèles sont destinés à des échelles plutôt locales (colonnes de sol, parcelle expérimentales...). Les méthodes statistiques, quant à elles, sont inapplicables pour ce projet parce qu'elles requièrent un jeu de données très important et surtout représentatif de la situation. Or, pour réaliser notre cartographie pédologique, nous avons cherché à raisonner, quantitativement et qualitativement, l'acquisition des données en fonction des connaissances bibliographiques et de notre expertise sur le terrain. Ce type de modèle n'est donc pas adapté. Il pourrait cependant être utilisé conjointement à un autre modèle, en appui, pour tester ou valider certaines hypothèses.

Les méthodes de cartographie à index avec pondération des critères apparaissent comme les plus adaptées de par la nature des informations dont nous disposons. De même, la méthode Siris, conceptuellement proche, permet d'utiliser essentiellement la hiérarchisation des critères sans pondération à dire d'experts. Nos données permettant de renseigner ces deux types de modèles, nous avons choisi de les présenter conjointement.

### 4.3 Démarche d'agrégation des données utilisées et résultats synthétiques

#### 4.3.1 Adimensionnalisation des variables

Dans un premier temps, nous avons choisi de rendre les données sans dimension sur des plages de valeurs adaptées ramenées dans un intervalle [0 ; 1]. Cette étape d'adimensionnalisation est nécessaire pour comparer et agréger des données dont les unités sont différentes : par exemple, les conductivités hydrauliques sont mesurées en  $\text{m.s}^{-1}$  tandis que les teneurs en matière organique sont en  $\text{g.kg}^{-1}$ . Par ailleurs, nous avons sélectionné des plages de valeurs qui sont adaptées à notre contexte d'étude. Par exemple, il n'est pas utile de couvrir toute la gamme de pH (de 0 à 14) ou un large champ de valeurs de conductivités hydrauliques parce que non seulement nous ne nous situons pas dans toute ces gammes mais cela aurait également pour effet de réduire significativement les variations observées entre nos valeurs.

Ainsi, une valeur  $Y_i$  d'une donnée quelconque (pH, taux de MO, etc.) est ramenée à une valeur  $Y_i'$  comprise dans un intervalle [0 ; 1] à l'aide de la formule suivante :

$$Y_i' = \frac{(Y_i - Y_{\min})}{(Y_{\max} - Y_{\min})}$$

#### 4.3.2 Agrégation et pondération des variables – modèle à indexation et pondération

Les valeurs, une fois adimensionnalisées, peuvent ensuite être agrégées et pondérées les unes par rapport aux autres selon un formalisme de type combinaison linéaire.

$$V = [a \text{ CH} + b \text{ MO} + c \text{ texture}] + [d \text{ ox.} + e \text{ pH} + f \text{ CEC}]$$

Avec  $V$  = indice de vulnérabilité ;

$a, b, c, d, e$  et  $f$  sont des valeurs de pondération pour chaque variable ;

CH = conductivité hydraulique à saturation ;

MO = taux de matière organique ;

texture = classe granulométrique ;

ox. = extractibilité à l'oxalate ;

CEC = capacité d'échange cationique.

Le choix des variables à prendre en compte repose sur notre connaissance existante du milieu physique et des processus hydrodynamiques et géochimiques impliqués lors du transfert de polluants dans ces types de sols (Bernard, 2004 ; Payet, 2005 ; Feder *et al.*, 2006 ; Feder et Findeling, 2007). Nous nous sommes appuyés également sur des tests de sensibilité afin de ne pas intégrer de variables inutiles parce que non discriminantes dans la plage de valeurs déterminée. Par ailleurs, nous avons fait attention à ne pas choisir des variables liées ou fortement corrélées entre elles (par exemple le taux de saturation en bases et le pH). Enfin, la profondeur des sols aurait pu être une variable à part entière mais nous avons préféré l'inclure directement dans les autres variables. Par exemple, le taux de matière organique a été calculé pour toute la profondeur du sol jusqu'à un mètre et ce pour tous les sols.

*In fine*, nous avons choisi de retenir six variables essentielles : la conductivité hydraulique, la classe granulométrique, le taux de matière organique, l'extractibilité à l'oxalate, le pH, la capacité d'échange cationique. Ces variables exercent une influence tant sur les aspects hydrodynamiques pour les trois premières, que géochimique pour les quatre dernières ; le taux de matière organique pouvant entrer dans les deux catégories.

La détermination des facteurs de pondération de ces variables a fait l'objet dans un premier temps d'une hiérarchisation afin de donner plus d'importance aux variables les plus explicatives. Puis, nous avons réalisé de nouveaux tests de sensibilité sur les facteurs de pondération afin de comprendre

l'influence de chaque variable. Il est apparu, par exemple, qu'un changement dans la pondération de plusieurs variables n'avait qu'un impact minime sur le résultat final (dans une certaine gamme de valeurs). Ainsi, nous avons déterminé un ensemble de valeurs robustes pour les facteurs de pondération. Nous évaluons la robustesse de ces facteurs de pondération par le fait qu'un faible changement ne modifie que peu l'évaluation globale de la vulnérabilité.

L'indice de vulnérabilité a été construit de manière à obtenir une notation comprise entre 0 et 5. Les classes de valeurs pour les deux modèles utilisés ont été uniformément réparties dans ces six classes. Les valeurs les plus faibles (0) correspondant à une vulnérabilité minimale et les valeurs les plus élevées (5) correspondent aux zones les plus vulnérables.

#### *4.3.3 Carte de vulnérabilité – modèle à indexation et pondération*

La figure 13 présente le résultat final de la carte de vulnérabilité sur la base des modélisations expliquées précédemment. En premier lieu, il apparaît deux types de zones où la vulnérabilité est maximale : les ravines et la zone située aux plus fortes altitudes de la zone d'étude. Dans ces deux situations, c'est l'absence de sols, et donc d'une zone tampon pour les transferts de polluants vers la nappe, qui explique cette vulnérabilité maximale. Toutes les autres situations résultent d'une combinaison complexe à expliciter des variables suivantes : la conductivité hydraulique, la classe granulométrique, le taux de matière organique, l'extractibilité à l'oxalate, le pH, la CEC.

Les principales raisons pour lesquelles les zones du bas de versant sont classées en vulnérabilité forte ou très forte sont : des conductivités hydrauliques à saturation très fortes, des taux de matière organique plus faible qu'en haut de versant, des valeurs de l'extractibilité à l'oxalate faibles. La zone d'altitude intermédiaire correspondant approximativement aux Andosols et aux Podzols montre les vulnérabilités les plus faibles grâce à la conjonction des facteurs les plus favorables.

Les types de sols et leurs propriétés étant fortement structurés parallèlement aux altitudes, il est logique que l'évaluation de la vulnérabilité soit structurée d'une manière semblable bien que cette zonation ne recouvre pas parfaitement la nature des sols.

#### *4.3.4 Carte de vulnérabilité – modèle Siris*

Contrairement à l'approche de modélisation par indexation et pondération, l'approche par Siris ne requiert qu'une hiérarchisation des propriétés pédologiques. Ainsi dans le cadre de cette étude, nous avons considéré la hiérarchisation suivante : Conductivité hydraulique > taux de matière organique > capacité d'échange cationique > capacité d'échange anionique (ou extraction à l'oxalate)

De même que pour le modèle à indexation et pondération, les zones de ravines et sans sols sont les plus vulnérables au transfert de polluants. Les autres situations reflètent la prépondérance, selon le modèle Siris, de certaines propriétés pédologique sur d'autres.

#### *4.3.5 Comparaison et analyse des résultats obtenus avec les deux modèles*

On observe de grandes similitudes entre les deux cartes de vulnérabilité obtenues avec les deux modèles. Pour les valeurs les plus élevées de l'indice de vulnérabilité (vulnérabilité = 5), les zones sans sols (ravines, affleurements rocheux, sols engorgés de l'étang Saint-Paul et Leptosols) sont, par définition, identiques pour les deux modèles.

Les zones les moins vulnérables sont partiellement localisées aux mêmes endroits. Cela recouvre notamment les Andosols, c'est-à-dire des terrains situés aux altitudes supérieures à 950 mètres. Les principaux facteurs expliquant cette faible vulnérabilité sont : les grandes épaisseurs du sol (généralement supérieur à 2 mètres), les forts taux de matière organique, les très fortes valeurs de CEC, les fortes valeurs de CEA et forts pourcentages de minéraux mal cristallisés (extraction à l'oxalate).

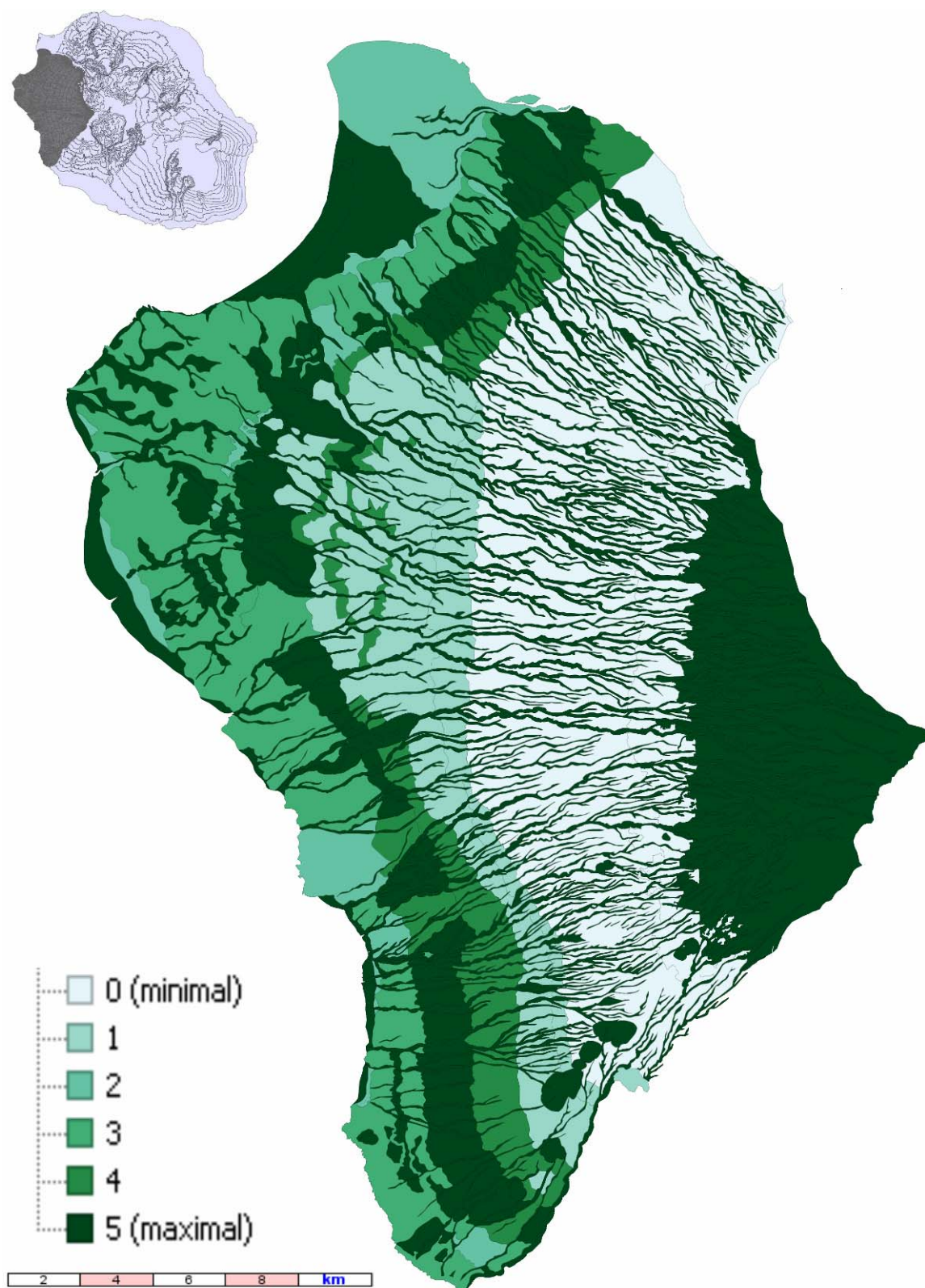


Figure 13 : carte de vulnérabilité de la zone d'étude comprise entre la rivière des Galets au nord et la ravine des Avirons au sud. *Modèle à indexation et pondération.*



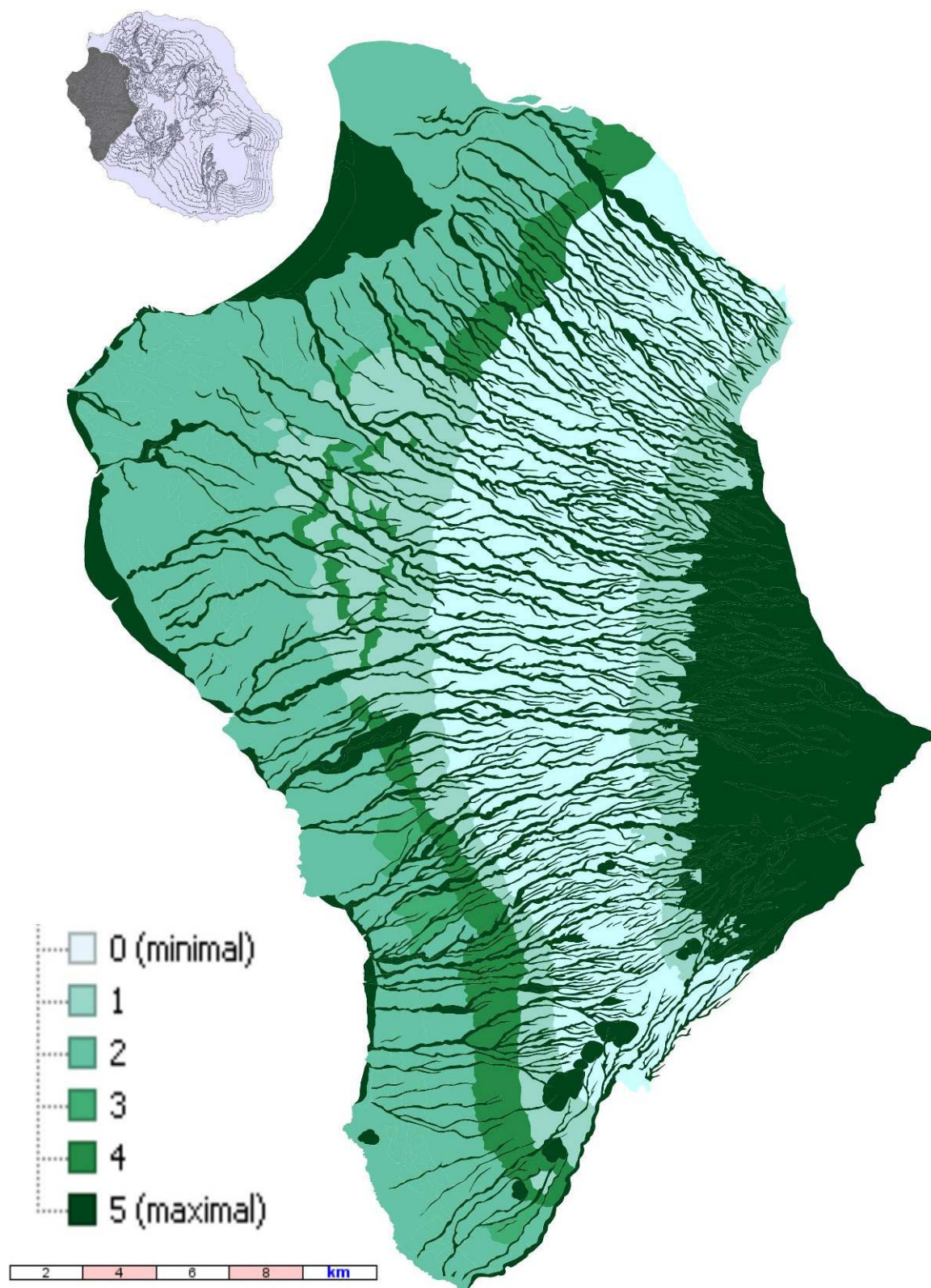


Figure 14 : carte de vulnérabilité de la zone d'étude comprise entre la rivière des Galets au nord et la ravine des Avirons au sud. *Modèle Siris*.

Les sols identifiés comme des Podzols andiques présentent un indice de vulnérabilité minimal (vulnérabilité = 0) avec le modèle à indexation et pondération et un indice légèrement plus fort avec le modèle Siris (vulnérabilité = 1). L'extension de la zone présentant un indice de vulnérabilité minimum vers les altitudes basses est plus importante avec le modèle Siris.

Dans la partie basse du versant, aux altitudes avoisinant 400 mètres, le modèle à indexation et pondération présente un indice de vulnérabilité maximal (5) tandis que le modèle Siris donne un indice légèrement moindre (4). Les raisons principales sont les pentes fortes (fin de la planèze), les affleurements rocheux nombreux, les fortes conductivités hydrauliques associés à des caractéristiques chimiques globalement défavorables. Le modèle à indexation et pondération tient particulièrement compte du facteur « conductivité hydraulique » ; c'est pour cela que cette zone présente, avec ce modèle une vulnérabilité maximale.

Aux altitudes comprises entre 0 et 400 mètres, la vulnérabilité est également légèrement plus forte (un point) avec le modèle à indexation et pondération qu'avec le modèle Siris. Cela s'explique également par une forte pondération du facteur « conductivité hydraulique » dans ce modèle tandis qu'avec Siris, ce facteur n'est pas pondéré mais simplement hiérarchisé c'est-à-dire considéré comme le plus important.

En conclusion, nous observons que la relation d'ordre entre les notes de vulnérabilité des unités cartographiques est toujours respectée entre les deux modèles. C'est logique puisque ce sont les mêmes arguments scientifiques qui sont utilisés pour classer les propriétés des sols dans le modèle Siris et pour pondérer les propriétés des sols dans le modèle à indexation et pondération. Le modèle Siris peut être considéré théoriquement comme plus fiable puisqu'il ne repose que sur une hiérarchisation des propriétés. Toutefois, le modèle à indexation et pondération est plus adaptable, plus souple et prend mieux en compte des valeurs extrêmes de certaines propriétés pédologiques. Ainsi, un sol présentant par exemple une valeur extrêmement forte de conductivité hydraulique, premier facteur par ordre d'importance, sera toujours classé en vulnérabilité maximale avec le modèle à indexation et pondération. En revanche, avec le modèle Siris, il pourra être classé de la même façon qu'un sol présentant une conductivité hydraulique moyenne, puisque cela dépendra également des autres propriétés.

Avec le modèle Siris, la répartition des notations est plus uniformément étagée tandis qu'avec le modèle à indexation et pondération, les différences sont plus marquées. Cela affecte visiblement les différences entre les notes de la vulnérabilité entre les unités. Le modèle à indexation et pondération (figure 13) est donc plus adapté pour identifier les territoires les plus vulnérables aux transferts de polluants vers les nappes phréatiques.

## 5 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

La démarche originale que nous avons adoptée nous a permis de distinguer et de localiser les zones les plus vulnérables au transfert de polluants vers la nappe. Compte tenu d'un contexte pédologique particulièrement diversifié et complexe, il apparaît que le sol peut jouer un rôle très variable vis-à-vis du transfert des polluants. Les modèles plus orientés hydro-géologie de type Drastic ne prennent pas en compte aussi finement cette variabilité du compartiment « sol ». Il serait donc intéressant d'intégrer nos conclusions dans ce type de modèle afin d'être plus complet et de prendre compte le sous-sol.

La principale difficulté d'interprétation liée à ce type d'approche par des modèles d'indexation et de pondération est de pouvoir comparer des situations complexes. En effet, si la démarche est tout à fait acceptable pour comparer directement des situations entre elles, elle souffre en revanche d'un manque de généralité. Par exemple, la comparaison des zones du bas de versant et de celles situées à des altitudes intermédiaires révèle des différences significatives vis-à-vis du transfert des polluants. En revanche, le degré de vulnérabilité n'a pas été normé avec pour objectif de comparer cette situation avec une autre, dans une région différente. Toutefois, notre objectif dans le cadre de ce travail a été atteint puisqu'il s'agissait plutôt de définir les zones les plus vulnérables et pas forcément l'intensité, le degré (dans l'absolu) de cette vulnérabilité. L'apport d'une méthode comme Siris ne permet pas de mieux discriminer ces zones vulnérables.

Une part importante de notre activité a été consacrée à l'établissement d'une nouvelle carte pédologique (mesures *in situ*, analyses au laboratoire, etc.) et à sa mise en forme dans un système d'information géographique. En effet, nous avons démontré l'absence de corrélation simple et univoque entre le système de classification des anciennes cartes pédologiques (CPCS, 1967) et la nouvelle nomenclature internationale utilisée (IUSS Working Group WRB, 2006).

La généralité de notre approche permet d'envisager une réutilisation, une adaptation rapide à un type de pollution (vulnérabilité spécifique) avec les mêmes données pédologiques mais un paramétrage différent, adapté à la nature du polluant et à ses interactions avec les sols. Par ailleurs, l'extension de cette cartographie à la zone ouest, voire à toute l'île, est possible et requerrait des délais moindres.

Enfin, si on se rapporte au schéma de la figure 2 présentant l'imbrication des notions de vulnérabilité, d'aléa et de risque, il apparaît que l'étape suivante à prendre en compte pour évaluer les risques de pollutions concerne l'aléa. En effet, après avoir déterminé la vulnérabilité des territoires, il est important de connaître les types de polluants et leurs quantités afin de déterminer les risques exacts de pollution.





## Références bibliographiques

- Albinet M. et Margat, J. (1970). Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM*, 2<sup>e</sup> série (3-4): 13-22.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. et Hacket, G. (1987). DRASTIC: a standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. Report (EPA/600/2-87/035), Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, 455 p.
- Aurousseau, P. (1999). Notions relatives au risque en environnement. Séance du conseil scientifique de l'environnement du 14 décembre 1999. (<http://viviane.roazhon.inra.fr/spanum/publica/risque/risque.htm>).
- Aurousseau, P., Gascuel-Odoux, C. et Squivalent, H. (1998). Éléments pour une méthode d'évaluation d'un risque parcellaire de contamination des eaux superficielles par les pesticides. *Étude et gestion des sols*, 5(3): 143-156.
- Bernard, H. (2004). Évaluation des risques de transfert d'herbicides dans les sols tropicaux de l'ouest de l'île de la Réunion. Thèse de doctorat de l'université de Poitiers. 201 p.
- Bertrand, R. (1972). Environnement et morphologie d'un andosol à horizon d'accumulation induré. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences. Série D : sciences naturelles* (275) : 1343-1346.
- Bezèlques S. et Garets, E. D. (2002). Cartographie de la vulnérabilité des nappes de Grande Terre et de Marie Galante. Phase 1 : méthodologie de détermination de la vulnérabilité. BRGM/RP-51783-FR.
- Bioteau, T., Bordevane, P., Laurent, F. et Ruelland, D. (2002). Évaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants : intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT. *Ingénieries*, 32, p. 3-12.
- CPCS (1967). *Classification des sols*. École nationale supérieure agronomique, Grignon, France, 87 p.
- FAO (2006). *Guidelines for soil description*. 4<sup>th</sup> edition. Rome.
- Feder, F. et Findeling, A. (2007). Retention and leaching of nitrate and chloride in an andic soil after pig manure amendment. *European Journal of Soil Science*. 58, 393-404. doi:10.1111/j.1365-2389.2006.00885.x
- Feder, F., Olivier, R., Alary, K. and Bourgeon, G. (2006). Characterisation Of a Soil Catena on the Western Slope of The Piton Des Neiges Volcano (la Réunion). [Cd-Rom], 18<sup>th</sup> World Congress of Soil Science. 2006/07/9-15, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
- Findeling, A. (2001). Étude et modélisation de certains effets du semis direct avec paillis de résidus sur les bilans hydrique, thermique et azoté d'une culture de maïs pluvial au Mexique. École nationale du génie rural des eaux et forêts, Montpellier : 357 p.
- Gaines, T. P. et Gaines, S. T. (1994). Soil Texture Effect on Nitrate Leaching in Soil Percolates. *Communications in soil science and plant analysis*, 25(13&14): 2561-2570.
- Guerbet, M. et Jouany, J. M. (2002). Value of the SIRIS method for the classification of a series of 90 chemicals according to risk for the aquatic environment. *Environmental Impact Assessment Review*, 22(4): 377-391.
- Gillman, G. P. et Sumner, M. E. (1987). Surface Charge Characterization and Soil Solution Composition of Four Soils from the Southern Piedmont in Georgia. *Soil Sc. Soc. Am. J.* 51: 589-594.
- Huddleston, J. H. (1996). *How soil properties affect groundwater vulnerability to pesticide contamination*. EM 8559. Oregon state university.

- IUSS Working Group WRB (2006). *World reference base for soil resources 2006*. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome.
- Koller, R., Sauter, J., Pierrillas, S. et Viro, M. (2004). Classification des bassins versants alsaciens en fonction de leur sensibilité aux produits phytosanitaires. *Étude et gestion des sols*, vol. 11 (3), p. 219-234.
- Landreau, A. et Talbo, H. (1996). Contribution à une normalisation des critères d'établissement des cartes de vulnérabilité aux pollutions des nappes souterraines. BRGM/RR-38846-FR.
- Laurent, F. et Rossignol, J.-P. (2004). Sensibilité d'un modèle agro-hydrologique à la cartographie des sols : test d'une méthode basée sur l'indice topographique et la lithologie. *Étude et gestion des sols*, 11(3): 199-217.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I. et Haverkamp, R. (2006). Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments – BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:521–532.
- Olivier, R. (2005). Étude d'une toposéquence dans l'île de la Réunion. CIRAD – UPR RELIER, Saint-Denis de la Réunion.
- Pallud, C., (2000). Étude multi-échelles du fonctionnement hydrodynamique et microbiologique d'un sol soumis à un apport de solutés : application à l'ammonium et au 2,4-D. Thèse de doctorat, université Joseph Fourier–Grenoble 1. 259 p.
- Palmer, R. C. (1995). *Guide to Groundwater Vulnerability Mapping in England and Wales*. The Stationery Office Books.
- Payet, N. (2005). Impact des apports de lisier sur un sol cultivé de la Réunion : étude expérimentale et modélisation des flux d'eau et de nitrate dans la zone non saturée. Université de la Réunion.
- Perret, S. (1992). Étude des propriétés physiques, hydriques et mécaniques des sols andiques de la Réunion. Thèse ENSA Montpellier.
- Raunet, M. (1991). *Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion : conséquences pour la mise en valeur agricole*. CIRAD – Région Réunion, Saint-Denis de la Réunion.
- Riquier, J. (1960). *Notices sur les cartes pédologiques de reconnaissance. Île de la Réunion*. Publications de l'institut de recherche scientifique de Madagascar, Tananarive-Tsimbazaza. 72 p.
- Schnebelen, N., Platel, J.-P., Le Nindre, Y. M., Baudry, D., Hoarau, A., Dufour P. et Benhammouda, S. (2002). Gestion des eaux souterraines en Aquitaine. Année 5. Opération sectorielle – Protection de la nappe de l'Oligocène en région bordelaise. Nouvelles connaissances hydrogéologiques. Cartographie de la vulnérabilité aux pollutions. BRGM/RP-51178-FR.
- Sheng, G., Yang, Y., Huang M. et Yang, K. (2005). Influence of pH on pesticide sorption by soil containing wheat residue-derived char. *Environmental Pollution*, 134, p. 457-463.
- Soil Survey Staff (2004). *Soil Survey Laboratory Methods Manual*. Soil Survey investigations reports, No 42, Version 4.0, USDA-NRCS.
- Vaillant, M., Jouany, J.M. et Devillers, J. (1995). A multicriteria estimation of the environmental risk of chemicals with the SIRIS method. *Toxicology Modeling*, vol. 1, no. 1, pp. 57-72.
- Zebrowski, C. (1975). Étude d'une climato-séquence dans l'île de la Réunion. *Cahiers Orstom, série pédologie*, 13(3/4): p. 255-278.

## 6 ANNEXE 1 : DESCRIPTIONS DES FOSSES PÉDOLOGIQUES



	<b>R-JGR-F1</b>	<b>R-JGR-F2</b>	<b>R-JGR-F3</b>
Coordonnées GPS	X = 326933 Y = 7661885	X = 326860 Y = 7662423	X = 325801 Y = 7658991
Altitude	1223	1245	711
Contexte	Prairie	Prairie	cannes à sucre
pente (%)	10	10	10
<b>H1 limite</b>	<b>0-10 cm</b>	<b>0-5/10 cm</b>	<b>0-25 cm</b>
couleur	7,5 YR 3/4	10 YR 3/4	10 YR 3/2
MO	oui	oui	oui
racines	oui	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	L	L	LA
<b>H2 limite</b>	<b>10-15 cm</b>	<b>5/10-25cm</b>	<b>25-120 cm</b>
couleur	10 YR 3/4	7,5 YR 4/6	10 YR 4/3
MO	oui	non	non
racines	oui	nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	LA	LA	AL
<b>H3 limite</b>	<b>15-30/35 cm</b>	<b>25-40 cm</b>	<b>120 et + pas de RM</b>
couleur	7,5 YR 3/4	10 YR 3/2	10 YR 3/3
MO	non	non	non
Racines	oui	peu nombreuses	non
éléments grossiers	non	non	non
texture	LA	LA	AL
<b>H4 limite</b>	<b>30-55 cm</b>	<b>40-70 cm</b>	
couleur	7,5YR4/6	7,5YR4/6	
MO	non	non	
racines	peu nombreuses	non	
éléments grossiers	graviers 1 à 5 %	non	
texture	LA	LA	
<b>H5 limite</b>	<b>55-80 cm</b>	<b>70-90 cm</b>	
couleur	7,5 YR 3/4	7,5 YR 3/4	
MO	non	non	
racines	non	non	
éléments grossiers	graviers 10 à 15 %	non	
texture	LA	LA	
<b>H6 limite</b>	<b>80-120cm</b>	<b>90 et + pas de RM</b>	
couleur	10 YR 4/6	10 YR 4/6	
MO	non	non	
racines	non	non	
éléments grossiers	non	graviers 5 %	
texture	LA	LA	
<b>H7 limite</b>	<b>120 et + pas de RM</b>		
couleur	10 YR 3/3		
racines	non		
MO	non		
éléments grossiers	non		
texture	LA		

	<b>R-JGR-F4</b>	<b>R-JGR-F5</b>	<b>R-JGR-F6</b>
Coordonnées GPS Altitude Contexte pente (%)	X = 323851 Y = 7660154 497 friche 20	X = 325664 Y = 7664036 1117 cryptomérias 5	X = 327346 Y = 7664281 1390 Prairie 5
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-20/30 cm</b> 10 YR 4/2  nombreuses graviers 2 % LS	<b>0-22 cm</b> 10 YR 3/3 oui très nombreuses non L	<b>0-7 cm</b> 10 YR 4/4 oui très nombreuses graviers 2 % L
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>20/30-90 cm RM</b> 10 YR 3/2  non graviers - cailloux 15 % A	<b>22-60/80 cm</b> 7,5 YR 4/4 non nombreuses cailloux 5 % LA	<b>7-22 cm</b> 10 YR 3/4 non peu nombreuses non LA
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture		<b>60/80-90/100 cm</b> 10 YR 4/4 non peu nombreuses cailloux 10 % L	<b>22-40 cm</b> 7,5 YR 4/6 non peu nombreuses non LA
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture		<b>90/100 et + pas de RM</b> 7,5 YR 4/4 non très peu nombreuses graviers 20 % LA	<b>40-60 cm</b> 10 YR 4/6 non très peu nombreuses graviers 1 à 5 % LA
<b>H5 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture			<b>60-80 cm</b> 5 YR 3/4 non non non AL
<b>H6 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture			<b>80-90 cm</b> 10YR3/3 non non non AL
<b>H7 limite</b> couleur racines MO éléments grossiers texture			<b>90 et + pas de RM</b> 10 YR 2/1 non non graviers 10 % A

	<b>R-JGR-F7</b>	<b>R-JGR-F8</b>	<b>R-JGR-F9</b>
Coordonnées GPS	X = 322424 Y = 7663223	X = 321377 Y = 7662132	X = 321283 Y = 7661815
Altitude	520	151	131
Contexte	cannes à sucre	friche	friche
pente (%)	17.50	8.56	8.77
<b>H1 limite</b>	<b>0-10/15 cm</b>	<b>0-35 cm RM</b>	<b>0-10/20 cm</b>
couleur	7,5 YR 3/2	10 YR 3/3	5 YR 3/4
MO	oui		
racines	nombreuses	nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	graviers 2 %	graviers 30 %	graviers 2 %
texture	LA	L	LAS
<b>H2 limite</b>	<b>10/15-40/50 cm</b>		<b>10/20-30/45 cm</b>
couleur	7,5 YR 3/2		2,5 YR 3/4
MO	non		non
racines	non		non
éléments grossiers	graviers - cailloux 10 %		peu nombreuses
texture	LA		cailloux 15 %
			A
<b>H3 limite</b>	<b>40/50-80 cm RM</b>		<b>Altérites RM</b>
couleur	10 YR 3/2		
MO	non		
Racines	non		
éléments grossiers	cailloux 2 0%		
texture	A		

	<b>R-JGR-F10</b>	<b>R-JGR-F11</b>	<b>R-JGR-F12</b>
Coordonnées GPS	X = 322318 Y = 7660927	X = 329359 Y = 7658381	X = 324337 Y = 7660989
Altitude	262	1776	707
Contexte	Prairie	Tamarins	friche
pente (%)	16.36	12.23	16.80
<b>H1 limite</b>	<b>0-50 cm</b>	<b>0-5 cm</b>	<b>0-10/20 cm</b>
couleur	7,5 YR 3/2	10 YR 2/2	7,5 YR 3/2
MO	oui	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	blocs 50 %	non	non
texture	LAS	LA	LA
<b>H2 limite</b>	<b>RM</b>	<b>5-40 cm</b>	<b>10/20-130</b>
couleur		7,5 YR 3/4	10 YR 3/4
MO		oui	non
racines		peu nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers		non	non
texture		L	L
<b>H3 limite</b>		<b>40-90 cm</b>	<b>Pas de RM à 130cm</b>
couleur		7,5 YR 4/4	
MO		non	
Racines		non	
éléments grossiers		pierre 20 %	
texture		L	
<b>H4 limite</b>		<b>90 et + pas de RM</b>	
couleur		7,5 YR 3/2	
MO		non	
racines		non	
éléments grossiers		non	
texture		L	



	<b>R-JGR-F13</b>	<b>R-JGR-F14</b>	<b>R-JGR-F15</b>
Coordonnées GPS	X = 322373 Y = 7659279	X = 323335 Y = 7659556	X = 329359 Y = 7658381
Altitude	88	320	629
Contexte	friche	Prairie	friche et Maïs
pente (%)	11.80	10.80	15.60
<b>H1 limite</b>	<b>0-25/30</b>	<b>0-25 cm</b>	<b>0-30/35 cm</b>
couleur	7,5 YR 3/2	10 YR 3/3	7,5 YR 4/3
MO	oui	oui	oui
racines	nombreuses	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	cailloux 20 %	graviers 3 %	cailloux 15 %
texture	LAS	LA	LAS
<b>H2 limite</b>	<b>25/30-50 cm</b>	<b>25-130 cm</b>	<b>30/35-75/90 cm</b>
couleur	7,5 YR 4/4	7,5 YR 4/4	10 YR 3/4
MO	non	non	non
racines	non	peu nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	graviers 30-40 %	graviers 65 %	cailloux 20 %
texture	AA	SL	LS
<b>H3 limite</b>	<b>RM à 50 cm</b>	<b>25-130 cm (langues)</b>	<b>75/90-130 cm</b>
couleur		5 YR 3/3	10 YR 3/3
MO		non	non
Racines		peu nombreuses	non
éléments grossiers		non	non
texture		LAS	LS
<b>H4 limite</b>		<b>pas de RM à 130 cm</b>	<b>pas de RM à 130 cm</b>
couleur			
MO			
racines			
éléments grossiers			
texture			

	<b>R-JGR-F16</b>	<b>R-JGR-F17</b>	<b>R-JGR-F18</b>
Coordonnées GPS	X = 328908 Y = 7657834	X = 329084 Y = 7659318	X = 329909 Y = 7661189
Altitude	1450	1593	1841
Contexte	Prairie	Prairie	Tamarins
pente (%)	7.32	10.37	12.11
<b>H1 limite</b>	<b>0-15/25 cm</b>	<b>0-10/15 cm</b>	<b>0-10 cm</b>
couleur	5 YR 3/2	5 YR 5/3	5 YR 2,5/2
MO	oui	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	AL	LS	SL
<b>H2 limite</b>	<b>15/25-35</b>	<b>0-10/15 cm</b>	<b>10-10/18 cm</b>
couleur	7,5 YR 4/4	2,5 YR 2,5/2	2,5 YR 4/2
MO	non	oui	oui
racines	très nombreuses	très nombreuses	très nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	LS	LS	SL
<b>H3 limite</b>	<b>35-65 cm</b>	<b>10/15-30 cm</b>	<b>10/18-20/30 cm</b>
couleur	10 YR 3/2	7,5 YR 3/2	5 YR 3/3
MO	non	non	non
Racines	nombreuses	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	AL	LAS	LS
<b>H4 limite</b>	<b>65-80 cm</b>	<b>30-55/60 cm</b>	<b>20/30-30/35 cm</b>
couleur	5 YR 4/4	5 YR 3/4	5 YR 3/2
MO	non	non	non
racines	nombreuses	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	AL	AL	LS
<b>H5 limite</b>	<b>80-95/105 cm</b>	<b>55/60-90 cm</b>	<b>303/35-140 cm</b>
couleur	10 YR 3/3	7,5 YR 4/4	7,5 YR 4/4
MO	non	non	non
racines	nombreuses	Non	non
éléments grossiers	non	non	pierres 10-15 %
texture	A	LA	L
<b>H6 limite</b>	<b>95/105-115 cm</b>	<b>90-140 cm</b>	<b>Pas de RM à 140 cm</b>
couleur	7,5 YR 4/4	10 YR 3/3	
MO	non	non	
racines	peu nombreuses	non	
éléments grossiers	non	blocs 30 %	
texture	AL	LAS	
<b>H7 limite</b>	<b>115-130 cm pas de RM</b>	<b>Pas de RM à 140 cm</b>	
couleur	10 YR 3/3		
racines	non		
MO	non		
éléments grossiers	non		
texture	AL		

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F19</b> X = 327757 Y = 7663390	<b>R-JGR-F20</b> X = 326177 Y = 7660965	<b>R-JGR-F21</b> X = 323340 Y = 7663429	<b>R-JGR-F22</b> X = 323335 Y = 7659556
Altitude Contexte pente (%)	1435 cryptomérias 10.60	1064 Prairie 11.82	700 canne à sucre 12.30	608 canne à sucre 11.67
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-10 cm</b> 5 YR 3/3 oui très nombreuses non SL	<b>0-10 cm</b> 7,5 YR 3/2 oui très nombreuses non LAS	<b>0-20 cm</b> 10 YR 4/3 oui peu nombreuses non LA	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/2 oui peu nombreuses cailloux 10 % LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>10-12/20 cm</b> 10 YR 4/6 oui nombreuses non -	<b>10-35 cm</b> 7,5 YR 4/4 nombreuses non LS	<b>20-90 cm</b> 7,5 YR 4/4 non peu nombreuses non L	<b>30-130 cm</b> 7,5 YR 3/4 non non cailloux 20 % LA
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture	<b>12/20-55 cm</b> 5 YR 3/3 non peu nombreuses non Las	<b>35-90 cm</b> 7,5 YR 4/4 non peu nombreuses non L	<b>90-120 cm</b> 10 YR 3/3 non non non Al	<b>Pas de RM à 130 cm</b>
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>55-90 cm</b> 5 YR 3/4 non non cailloux 50 % AL	<b>90-100/110 cm</b> 5 YR 5/6 non non non AL	<b>Pas de RM à 130 cm</b>	
<b>H5 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>90-140 cm</b> 10 YR 3/4 non non cailloux 15-20 % LAS	<b>100/110-120 cm</b> 7,5 YR 3/4 non non graviers 5 % LAS		
<b>H6 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>Pas de RM à 140 cm</b>	<b>120-130 cm</b> 5 YR 4/6 non non graviers 10/15 % AS		
<b>H7 limite</b>		<b>Pas de RM à 130 cm</b>		

	<b>R-JGR-F23</b>	<b>R-JGR-F24</b>	<b>R-JGR-F25</b>
Coordonnées GPS	Lat : 21°07'14,201 Long : 55°18'06,754	Lat : 21°08'30,202 Long : 55°21'51,25	Lat : 21°09'14,243 Long : 55°21'57,11
Altitude	758	1917	1832
Contexte	C à S	Broussaille d'altitude	Végétation d'altitude
<b>H1 limite</b>	<b>0-40 cm</b>	<b>0-10 cm</b>	<b>0-10 cm</b>
couleur	10 YR 3/3	5 YR 2,5/2	10 YR 4/2
MO	oui	oui	oui
racines	oui	nombreuses	nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	LS	LS	LAS
<b>H2 limite</b>	<b>40-180 cm</b>	<b>10-20cm</b>	<b>10-30 cm</b>
couleur	7,5 YR 3/4	10 YR 3/3	7,5 YR 3/4
MO	non	oui	non
racines	oui	nombreuses	peu nombreuses
éléments grossiers	non	non	non
texture	LA	LS	AL
<b>H3 limite</b>	<b>180-200 et + cm</b>	<b>20-40 cm</b>	<b>30-60 cm</b>
couleur	10 YR 3/3	10 YR 4/4	10 YR 4/3
MO	non	non	non
Racines	non	peu nombreuses	non
éléments grossiers	10 %	40 %	40 %
texture	LA	LAS	AL
<b>H4 limite</b>		<b>40-65 cm</b>	
couleur		10 YR 4/3	
MO		non	
racines		non	
éléments grossiers		70 %	
texture		LAS	
<b>H5 limite</b>		<b>65-70 et + cm</b>	
couleur		10 YR 4/3	
MO		non	
racines		non	
éléments grossiers		altérite	
texture			

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F26</b> Lat : 21°00'21,737 Long : 55°20'26,117	<b>R-JGR-F27</b> Lat : 21°00',58 Long : 55°20'29,88	<b>R-JGR-F28</b> X = 330130.327 Y = 7670033.324	<b>R-JGR-F29</b> Lat : 21°02'23,951 Long : 55°19'33,164
Altitude	748	777	1710	955
Contexte	friches	friches	Tamarins	friches
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-20 cm</b> - oui nombreuses non LS	<b>0-25/30 cm</b> - oui très nombreuses non LS	<b>0-75 cm</b> 10 YR 3/4 oui très nombreuses non LAS	<b>0-20 cm</b> 10 YR 4/4 oui très nombreuses non LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>20-70 cm</b> - non Peu nombreuses non LA	<b>25/30-70/80 cm</b> - non Peu nombreuses non LA	<b>75-80 cm</b> 10 YR 2/1 non Peu nombreuses non LS	<b>20-60 cm</b> 10 YR 3/4 non nombreuses non LAS
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture	<b>70-150 et + cm</b> - non non non AL	<b>70/80-130 et + cm</b> - non non Pierres (5 %) AL	<b>80-90 cm</b> 5 YR 5/2 non peu nombreuses non LS	<b>60-120 cm</b> 10 YR 3/6 non peu nombreuses Cailloux (10 %) LA
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture			<b>90-135cm</b> 7,5 YR 3/4 non non Cailloux (10 %) LA	<b>120-150 et + cm</b> 10 YR 3/3 non non non non LA
<b>H5 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture			<b>135-150 et + cm</b> 10 YR 5/8 non non Cailloux (15 %) LA	

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F30</b> Lat : 21°02'18,877 Long : 55°21'14,81	<b>R-JGR-F31</b> Lat : 21°01'14,751 Long : 55°19'06,426	<b>R-JGR-F32</b> Lat : 21°03'37,989 Long : 55°18'37,373	<b>R-JGR-F33</b> Lat : 21°04'24,815 Long : 55°17'14,054
Altitude Contexte	1350 prairie	640 Prairie	898 Prairie	625 C à S
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-20 cm</b> 10 YR 3/4 oui très nombreuses non LAS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/2 oui très nombreuses non LAS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/2 oui très nombreuses non LAS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/3 oui très nombreuses non LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>20-80 cm</b> 7,5 YR 4/4 oui nombreuses non LAS	<b>10-35 cm</b> 7,5 YR 3/2 non Peu nombreuses non LA	<b>30-60 cm</b> 7,5 YR 3/4 oui nombreuses non LA	<b>30-70 cm</b> 10 YR 4/3 non Peu nombreuses cailloux (5 %) LA
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture	<b>80-120 cm</b> 10 YR 3/3 non peu nombreuses non LA	<b>30-80 cm</b> 10 YR 3/3 non non non AL	<b>60-90 cm</b> 10 YR 3/3 non peu nombreuses non LA	<b>70-120 cm</b> 7,5 YR 3/4 non non cailloux (40 %) LA
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>120-150 et + cm</b> 10 YR 3/2 non non cailloux (15 %) LAS		<b>90-140 et + cm</b> 10 YR 3/4 non non non AL	

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F34</b> Lat : 20°59'41,133 Long : 55°20'14,818	<b>R-JGR-F35</b> Lat : 21°04'27,693 Long : 55°19'18,423	<b>R-JGR-F36</b> Lat : 21°06'13,806 Long : 55°19'47,022	<b>R-JGR-F37</b> X = 32579,486 Y = 7674509,227
Altitude Contexte	490 C à S	1045 Prairie	1201 Prairie	750 haricots
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-20/40 cm</b> 10 YR 3/2 oui peu nombreuses Cailloux (5 %) LAS	<b>0-15 cm</b> 10 YR 3/3 oui très nombreuses non LAS	<b>0-15 cm</b> 10 YR 3/4 oui très nombreuses non LAS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/3 oui très nombreuses non LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>20/40-90 cm</b> 10 YR 3/3 non Peu nombreuses Cailloux (10 %) LA	<b>15-45 cm</b> 10 YR 4/6 oui Peu nombreuses non LA	<b>15-90 cm</b> 7,5 YR 3/4 non Peu nombreuses non LA	<b>30-50 cm</b> 10 YR 4/3 Peu nombreuses non LA
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture	<b>90-150 cm</b> 10 YR 3/3 non non Pierres (30 %) LA	<b>45-85 cm</b> 10 YR 5/8 non Peu nombreuses non LA	<b>90-130 cm</b> 10 YR 3/3 non peu nombreuses Cailloux (20 %) LA	<b>50-140 cm</b> 10 YR 4/4 non non non LA
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture		<b>85-105 cm</b> 7,5 YR 4/4 non Peu nombreuses non LA		
<b>H5 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture		<b>105-130 cm</b> 10 YR 3/3 non non graviers 5 % AL		

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F38</b> X = 32647,738 Y = 7675850,01	<b>R-JGR-F39</b> Lat : 21°04'02 Long : 55°18'15	<b>R-JGR-F40</b> Lat : 21°05'41 Long : 55°18'28	<b>R-JGR-F20</b> X = 329919,353 Y = 7665014,498
Altitude Contexte	630 CàS	1064 Maïs	880 CàS	1810 Tamarins
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-30 cm</b> 7,5 YR 3/2 oui nombreuses Cailloux (5 %) LAS	<b>0-35 cm</b> 10 YR 3/4 oui Peu nombreuses non LAS	<b>0-40 cm</b> 10 YR 5/4 oui très nombreuses non LAS	<b>0-10 cm</b> 10 YR 2/2 oui très nombreuses non LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>30-90 cm</b> 10 YR 3/4 oui nombreuses Blocs (10 %) LAS	<b>35-95 cm</b> 7,5 YR 3/4 non non non LA	<b>40-95 cm</b> 10 YR 4/4 oui nombreuses non LA	<b>10-20 cm</b> 7,5 YR 5/2 oui nombreuses non SL
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture	<b>90-120 cm</b> 10 YR 4/3 non non Blocs (10 %) LA	<b>95-130 et + cm</b> 10 YR 4/3 non non non LA	<b>95-140 cm</b> 10 YR 3/3 non non cailloux (10 %) LAS	<b>20-30/35 cm</b> 5 YR 2,5/2 non non non SL
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture				<b>30/35-40/50cm</b> 7,5 YR 5/2 non non non SL
<b>H5 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture				<b>40/50-60 cm</b> 5 YR 2,5/2 non non non SL
<b>H6 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture				<b>60-70 cm</b> 7,5 YR 3/4 non non non LA
<b>H7 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture				<b>70-130 et + cm</b> 10 YR 4/3 non non non LA



Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F42</b> X = 327410,914 Y = 7674887,342	<b>R-JGR-F43</b> X = 324633,126 Y = 7673233,695	<b>R-JGR-F44</b> X = 321861.4 Y = 7668633.836	<b>R-JGR-F45</b> X = 322814.495 Y = 7667914.004
Altitude Contexte	905 prairie	705 Prairie	620 maraîchage	730 CàS
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-30 cm</b> 10 YR 4/4 oui très nombreuses non -	<b>0-50 cm</b> 10 YR 3/3 oui très nombreuses non LAS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/3 oui peu nombreuses non LAS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/3 oui très nombreuses non LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>30-50 cm</b> 10 YR 4/6 oui nombreuses non -	<b>50-90 cm</b> 10 YR 3/4 non non non LA	<b>30-110 cm</b> 7,5 YR 3/4 non non non LA	<b>30-90 cm</b> 10 YR 3/3 non non non LA
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture	<b>50-75 cm</b> 10 YR 4/4 non peu nombreuses non -	<b>90-150 cm</b> 10 YR 4/4 non non non LA	<b>110-130 et + cm</b> 10 YR 3/3 non non non LA	<b>90-110 cm</b> 10 YR 4/2 non non Cailloux (15 %) LA
<b>H4 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>75-100 cm</b> 7,5 YR 4/4 non non non -			
<b>H5 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>100-150 cm</b> 10 YR 3/3 non non cailloux (10 %) -			

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F46</b> X = 321058.847 Y = 7670188.107	<b>R-JGR-F47</b> Lat : 21°02'36,984 Long : 55°13'43,173	<b>R-JGR-F48</b> Lat : 21°02'31,765 Long : 55°14'08,671	<b>R-JGR-F49</b> Lat : 21°01'50 Long : 55°14'12
Altitude Contexte	475 friche	65 Manguiers	102 friche	130 Manguiers
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/4 oui peu nombreuses non LS	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/2 oui peu nombreuses Cailloux (40 %) LAS	<b>0-35 cm</b> 10 YR 4/2 oui peu nombreuses non LS	<b>0-45 cm</b> 10 YR 4/2 oui peu nombreuses non LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture		<b>30-60 cm</b> 10 YR 4/2 non non Cailloux (50 %) LAS	<b>35-70 cm</b> 10 YR 3/2 non non Cailloux (50 %) LS	

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F50</b> Lat : 21°02'44,686 Long : 55°16'17,208	<b>R-JGR-F51</b> X = 325685.9 Y = 7669933.188	<b>R-JGR-F52</b> X = 324233.328 Y = 7673477.971	<b>R-JGR-F53</b> X = 316140.299 Y = 7668961.174
Altitude Contexte	370 Sol nu	1020 Prairie	640 CàS	45 CàS
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-55 cm</b> 10 YR 3/3 oui peu nombreuses non LAS	<b>0-40 cm</b> 10 YR 3/6 oui Peu nombreuses Cailloux (25 %) LAS	<b>0-20 cm</b> 10 YR 3/3 oui nombreuses non LAS	<b>0-50 cm</b> 10 YR 3/1 oui nombreuses Cailloux (10 %) -
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>55-80 cm</b> 10 YR 4/4 oui non non LA	<b>40-100 cm</b> 10 YR 4/2 non Peu nombreuses Cailloux (10 %) LA	<b>20-120 cm</b> 10 YR 3/3 non Peu nombreuses non LA	<b>50-70 cm</b> -  non Pierres (70 %) -
<b>H3 limite</b> couleur MO Racines éléments grossiers texture			<b>120-160 cm</b> 10 YR 3/2 non peu nombreuses Cailloux (20 %) LA	

Coordonnées GPS	<b>R-JGR-F54</b> X = 316718.134 Y = 7669932.255	<b>R-JGR-F55</b> X = 323671.166 Y = 7677470.288	<b>R-JGR-F56</b> X = 323983.221 Y = 7680733.716	<b>R-JGR-F57</b> X = 326099.223 Y = 7680048.586
Altitude Contexte	145 CàS	30 Manguiers	100 Friche + CàS	120 maraîchage
<b>H1 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture	<b>0-70 cm</b> 10 YR 3/1 oui peu nombreuses Pierres, cailloux (25 %) SL	<b>0-50 cm</b> 10 YR 3/2 oui peu nombreuses non -	<b>0-30 cm</b> 10 YR 3/2 oui peu nombreuses Pierres, cailloux (60 %) LS	<b>0-50 cm</b> 10 YR 3/3 oui peu nombreuses cailloux (30 %) LAS
<b>H2 limite</b> couleur MO racines éléments grossiers texture		<b>50-80 cm</b> 10 YR 4/2 non nombreuses non -		



## 7 ANNEXE 2 : RÉSULTATS DES ANALYSES

	échantillon horizon	JGR-F1 H1	JGR-F1 H2	JGR-F1 H3	JGR-F1 H4	JGR-F1 H5	JGR-F1 H6	JGR-F1 H7	JGR-F2 H1	JGR-F2 H2	JGR-F2 H3	JGR-F2 H4	JGR-F2 H5	JGR-F2 H6	JGR-F3 H1	JGR-F3 H2	JGR-F3 H3	JGR-F4 H1
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																		
Argiles	%														48.40	35.60	60.50	53.60
Limons fins	%														33.40	34.00	31.30	24.40
Limons grossiers	%														8.00	19.30	5.40	13.70
Sables fins	%														6.30	7.20	1.80	3.30
Sables grossiers	%														3.90	3.90	1.00	5.00
<b>(sans U-S)</b>																		
Argiles	%														11.57	0.33	6.98	48.44
Limons fins	%														27.27	4.85	9.99	24.83
Limons grossiers	%														27.83	9.76	20.54	12.87
Sables fins	%														22.85	26.46	42.25	4.35
Sables grossiers	%														10.48	58.59	20.24	9.51
<b>Matière organique</b>																		
C org.	%	10.10	6.69	6.73	6.11	5.47	2.37	1.21	9.47	8.62	5.87	5.90	4.67	5.04	3.89	1.45	0.87	2.30
Azote total	‰	6.61	3.68	3.60	3.15	2.83	1.33	0.65	5.67	4.57	3.52	3.12	2.75	2.20	3.97	1.26	0.55	1.94
<b>Complexe d'échange</b>																		
Al éch KCl	me/100g	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.32	0.19	0.08	0.04	0.04	0.06	0.01				
H éch KCl	me/100g	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.10	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01				
Ca éch (acétate)	me/100g	1.00	0.17	0.09	0.10	0.05	0.05	0.20	1.69	0.54	0.35	0.05	0.09	0.04	5.07	2.68	3.75	5.12
Mg éch (acétate)	me/100g	0.46	0.16	0.09	0.05	0.05	0.04	0.13	0.22	0.08	0.29	0.06	0.05	0.05	1.64	0.76	0.70	3.73
K éch (acétate)	me/100g	0.47	0.12	0.09	0.06	0.15	0.31	0.11	0.30	0.35	0.24	0.16	0.06	0.04	0.33	0.07	0.04	2.00
Na éch (acétate)	me/100g	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.14	0.47	0.07	0.04	0.03	0.02	0.05	0.02	0.08	0.34	1.42	0.28
CEC (acétate)	me/100g	51.27	51.99	56.59	50.03	48.21	27.66	21.69	57.09	67.45	55.41	54.01	52.37	54.85	26.43	20.46	23.33	22.05
TS (acétate)	%	3.88	0.94	0.52	0.52	0.62	1.91	4.15	3.98	1.48	1.65	0.54	0.47	0.26	27.00	18.78	25.33	50.49
<b>Extractions sélectives</b>																		
P rétention	%	99.53	99.73	99.75	99.82	99.82	99.21	94.09	99.50	99.73	99.77	99.80	99.75	99.76	84.20	97.26	87.08	51.70
Fe (CBD)	g/kg	87.23	83.40	73.79	87.92	89.15	87.16	100.79	67.14	82.26	69.45	89.77	102.83	103.61	102.87	117.80	104.72	67.52
Al (CBD)	g/kg	44.09	47.59	48.07	48.47	44.93	41.15	20.63	37.39	47.16	39.01	48.75	45.06	53.39	28.79	34.53	20.16	7.89
Si (CBD)	g/kg	5.15	6.71	8.15	7.12	5.27	10.63	5.43	4.69	4.87	6.47	6.35	7.75	6.85	6.90	9.38	4.23	3.92
Fe (ox.)	g/kg	38.30	31.24	18.27	18.08	23.77	40.14	20.89	32.42	30.01	14.69	18.87	16.97	24.84	13.52	15.64	9.19	5.95
Al (ox.)	g/kg	70.00	77.56	76.00	74.43	72.37	35.87	13.49	69.02	78.13	71.78	73.01	68.89	71.19	13.33	16.48	7.20	4.18
Si (ox.)	g/kg	18.74	22.20	22.28	21.39	21.72	9.41	3.13	20.89	22.86	23.65	23.85	23.46	22.45	2.93	5.40	2.27	1.32
D.O. à 430 nm																		
Fe (py.)	g/kg	31.97	15.74	3.80	1.96	2.61	5.47	5.40	26.95	18.00	2.64	2.46	1.45	1.50	5.31	1.81	2.22	0.91
Al (py.)	g/kg	23.97	14.45	10.18	8.66	7.36	7.10	4.64	20.32	16.71	8.93	9.25	7.36	7.39	5.40	2.75	1.35	1.02

	échantillon horizon	JGR-F4 H2	JGR-F5 H1	JGR-F5 H2	JGR-F5 H3	JGR-F5 H4	JGR-F6 H1	JGR-F6 H2	JGR-F6 H3	JGR-F6 H4	JGR-F6 H5	JGR-F6 H6	JGR-F6 H7	JGR-F7 H1*	JGR-F7 H2*	JGR-F7 H3*	JGR-F8 H1*	JGR-F9 H1*
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																		
Argiles	%	54.80												43.40	48.90	47.30	39.10	57.80
Limons fins	%	22.10												33.00	32.90	33.00	35.80	23.60
Limons grossiers	%	14.40												10.60	9.00	11.20	14.00	7.10
Sables fins	%	3.80												5.70	4.00	4.20	5.00	4.80
Sables grossiers	%	4.80												7.30	5.20	4.30	6.20	6.60
<b>(sans U-S)</b>																		
Argiles	%	48.99												38.32	37.47	37.99	32.97	53.57
Limons fins	%	25.20												35.94	38.40	37.98	38.36	23.21
Limons grossiers	%	14.12												11.04	13.80	14.09	16.20	9.24
Sables fins	%	5.10												6.51	4.75	4.99	5.19	6.64
Sables grossiers	%	6.59												8.19	5.58	4.94	7.29	7.34
<b>Matière organique</b>																		
C org.	%	0.46	11.33	1.44	0.65	0.93	3.94	1.08	1.27	1.50	2.04	1.71	1.38	2.29	2.13	2.09	4.01	2.04
Azote total	‰	0.42	6.87	1.02	0.45	0.59	2.93	0.72	0.90	0.95	1.32	1.03	0.88	2.10	1.99	1.97	3.49	1.60
<b>Complexe d'échange</b>																		
Al éch KCl	me/100g						1.37	7.51	5.49	2.43	0.47	0.13	0.21					
H éch KCl	me/100g						0.75	1.61	1.29	0.73	0.28	0.05	0.13					
Ca éch (acétate)	me/100g	3.93	10.59	1.27	2.63	1.41	4.83	1.90	0.91	0.35	0.21	0.20	0.10	7.08	9.11	8.04	28.04	14.41
Mg éch (acétate)	me/100g	3.31	3.23	0.79	2.06	0.85	2.63	0.96	0.69	0.35	0.17	0.20	0.37	2.40	2.55	2.53	5.62	6.18
K éch (acétate)	me/100g	3.98	0.63	0.14	0.30	0.11	2.00	0.65	0.18	0.11	0.06	0.05	0.10	2.34	1.66	1.20	1.59	0.79
Na éch (acétate)	me/100g	0.94	0.15	0.46	0.75	0.22	0.22	0.54	0.49	0.41	0.62	0.66	0.51	0.12	0.12	0.19	0.23	0.91
CEC (acétate)	me/100g	27.18	50.19	40.77	21.74	35.79	41.69	40.07	26.71	28.28	35.87	25.87	23.01	24.63	22.65	23.74	28.74	26.09
TS (acétate)	%	44.71	29.09	6.49	26.38	7.23	23.21	10.10	8.46	4.30	2.94	4.28	4.65	48.46	59.36	50.36	> 100	85.44
<b>Extractions sélectives</b>																		
P rétention	%	59.59	96.93	97.92	83.23	99.13	84.40	86.06	86.77	93.98	96.49	97.43	94.91	60.52	63.30	65.13	31.60	31.45
Fe (CBD)	g/kg	56.07	90.14	108.23	91.18	117.08	60.04	51.08	58.84	67.38	82.51	94.24	103.45	78.56	77.88	76.92	55.62	58.53
Al (CBD)	g/kg	6.78	30.98	33.65	14.75	38.57	11.75	10.57	12.36	20.83	27.92	32.34	26.24	12.54	11.56	11.88	5.14	3.96
Si (CBD)	g/kg	3.53	6.99	16.18	13.12	18.88	5.32	5.61	5.55	8.68	10.77	12.07	10.73	5.49	5.21	4.74	5.54	5.49
Fe (ox.)	g/kg	5.41	33.96	20.67	15.95	21.78	21.18	17.24	17.05	11.87	16.68	20.41	19.06	11.29	10.49	10.66	6.59	3.85
Al (ox.)	g/kg	4.60	30.17	29.70	13.76	53.36	10.98	9.94	10.63	15.68	23.58	26.11	19.00	9.18	8.07	8.59	3.95	3.15
Si (ox.)	g/kg	1.35	7.41	13.82	5.60	29.47	1.96	1.75	2.10	4.41	8.91	10.68	7.61	3.35	2.83	2.82	1.69	1.38
D.O. à 430 nm																		
Fe (py.)	g/kg	0.17	29.83	1.56	1.34	0.83	15.92	6.83	9.84	14.16	11.66	2.58	2.40	1.87	1.36	1.77	0.51	0.30
Al (py.)	g/kg	0.60	17.98	3.38	2.63	3.52	8.07	5.01	7.20	15.45	9.97	4.62	3.83	2.01	1.68	2.09	0.68	0.56

	échantillon horizon	JGR-F9 H2*	JGR-F9 H3*	JGR-F10 H1*	JGR-F11 H1	JGR-F11 H2	JGR-F11 H3	JGR-F12 H1	JGR-F12 H2	JGR-F13 H1*	JGR-F14 H1*	JGR-F14 H2*	JGR-F15 H1*	JGR-F15 H2*	JGR-F15 H3*	JGR-F16 H1
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																
Argiles	%	52.20	28.50	53.40						60.20	48.20	27.10	69.80	71.60	47.10	
Limons fins	%	21.70	10.60	25.90						24.60	29.50	21.90	21.00	18.70	26.10	
Limons grossiers	%	7.90	8.70	6.90						7.70	12.90	11.50	5.50	7.00	17.10	
Sables fins	%	9.20	12.60	3.80						2.80	6.10	12.30	1.90	1.60	7.00	
Sables grossiers	%	9.00	39.50	10.00						4.60	3.40	27.20	1.70	1.10	2.70	
<b>(sans U-S)</b>																
Argiles	%	40.65	19.83	50.07						57.65	42.93	17.70	68.27	70.09	30.79	
Limons fins	%	19.30	9.10	26.47						26.89	28.39	17.61	13.66	20.90	25.13	
Limons grossiers	%	10.72	9.16	7.07						7.24	12.77	11.62	0.11	5.95	20.14	
Sables fins	%	11.61	14.67	5.05						3.56	7.46	13.88	13.34	1.70	14.63	
Sables grossiers	%	17.71	47.25	11.33						4.66	8.45	39.20	4.62	1.36	9.31	
<b>Matière organique</b>																
C org.	%	0.44	0.22	2.46	16.98	9.10	5.08	3.47	1.13	1.93	1.93	0.30	3.08	0.95	0.71	9.28
Azote total	‰	0.36	0.22	2.41	15.49	6.06	3.06	3.19	1.18	1.77	1.64	0.23	2.69	0.69	0.48	6.54
<b>Complexe d'échange</b>																
Al éch KCl	me/100g				1.61	0.14	0.02	0.01	0.01							0.50
H éch KCl	me/100g				0.49	0.04	0.01	0.06	0.01							0.39
Ca éch (acétate)	me/100g	15.93	15.69	13.48	2.05	0.05	0.03	5.45	5.15	15.05	5.37	5.86	7.06	5.03	4.62	3.00
Mg éch (acétate)	me/100g	8.36	7.80	3.67	0.52	0.06	0.02	1.98	1.29	5.55	2.18	1.74	2.77	1.14	1.07	1.63
K éch (acétate)	me/100g	1.64	1.01	2.07	0.16	0.07	0.03	0.47	0.06	0.27	2.40	2.82	1.76	0.06	0.04	0.13
Na éch (acétate)	me/100g	1.67	2.72	0.11	0.06	0.04	0.03	0.31	0.88	0.31	0.32	0.87	0.20	1.30	1.07	0.07
CEC (acétate)	me/100g	36.25	36.45	22.66	45.65	37.97	44.17	22.37	19.82	22.77	19.97	19.80	24.42	23.11	23.76	36.09
TS (acétate)	%	76.12	74.68	85.26	6.11	0.58	0.27	36.67	37.25	93.00	51.43	57.04	48.28	32.52	28.63	13.37
<b>Extractions sélectives</b>																
P rétention	%	50.09	47.32	42.15	95.82	99.44	99.52	65.71	79.23	39.75	40.75	38.25	61.39	74.99	91.58	89.16
Fe (CBD)	g/kg	65.45	51.15	61.00	62.37	102.61	102.19	92.78	94.68	57.72	44.70	28.56	75.93	81.80	74.85	62.14
Al (CBD)	g/kg	3.99	3.90	5.26	18.41	38.94	45.86	15.20	15.74	5.68	4.62	3.47	13.41	15.12	22.13	6.79
Si (CBD)	g/kg	5.72	8.76	5.06	4.76	5.47	12.14	3.16	3.59	5.53	3.63	4.54	3.35	3.46	8.38	3.47
Fe (ox.)	g/kg	6.40	5.38	5.26	25.59	59.96	33.78	7.22	8.10	5.53	4.11	4.21	6.67	7.06	6.16	42.29
Al (ox.)	g/kg	3.93	4.28	4.23	18.03	41.63	61.70	5.14	5.24	3.67	3.63	3.62	6.08	5.77	16.10	6.48
Si (ox.)	g/kg	1.88	1.98	1.63	1.32	7.57	22.56	1.19	1.68	1.56	1.09	1.45	1.80	1.63	7.40	1.22
D.O. à 430 nm					1.481	3.342	2.547									
Fe (py.)	g/kg	0.14	0.13	0.43	16.46	62.77	13.05	3.08	0.64	0.40	0.53	0.18	2.78	1.86	1.24	45.00
Al (py.)	g/kg	0.47	0.47	0.79	14.34	30.05	11.41	1.74	0.75	0.57	0.85	0.45	1.86	1.33	2.47	5.79



		échantillon	JGR-F16	JGR-F16	JGR-F16	JGR-F16	JGR-F16	JGR-F16	JGR-F17	JGR-F17	JGR-F17	JGR-F17	JGR-F17	JGR-F18	JGR-F18	JGR-F18	JGR-F18
		horizon	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4
<b>Granulométrie</b>																	
<b>(avec U-S)</b>																	
Argiles	%																
Limons fins	%																
Limons grossiers	%																
Sables fins	%																
Sables grossiers	%																
<b>(sans U-S)</b>																	
Argiles	%																
Limons fins	%																
Limons grossiers	%																
Sables fins	%																
Sables grossiers	%																
<b>Matière organique</b>																	
C org.	%		8.01	6.26	7.54	6.91	6.82	6.03	14.35	11.39	10.03	4.52	2.56	5.58	6.66	4.47	10.04
Azote total	‰		4.89	3.70	3.86	3.72	3.48	3.04	10.67	6.94	5.82	2.54	1.54	6.33	6.96	3.72	7.97
<b>Complexe d'échange</b>																	
Al éch KCl	me/100g		0.96	0.09	0.01	0.01	0.03	0.01	0.39	0.71	0.05	0.01	0.16	0.19	0.57	1.04	2.98
H éch KCl	me/100g		0.40	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.36	0.33	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.21	0.37
Ca éch (acétate)	me/100g		1.11	0.26	0.09	0.11	0.08	0.07	1.10	0.29	0.03	0.03	0.02	4.24	4.43	1.75	2.09
Mg éch (acétate)	me/100g		0.81	0.28	0.16	0.17	0.11	0.13	0.82	0.21	0.04	0.05	0.03	1.99	1.63	0.67	0.97
K éch (acétate)	me/100g		0.08	0.04	0.08	0.04	0.02	0.02	0.20	0.07	0.04	0.03	0.04	0.25	0.06	0.04	0.09
Na éch (acétate)	me/100g		0.06	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.10	0.04	0.03	0.02	0.02	0.09	0.06	0.04	0.06
CEC (acétate)	me/100g		39.29	95.27	85.37	85.87	79.87	84.87	85.37	92.77	87.77	39.23	23.05	22.05	37.53	23.02	46.57
TS (acétate)	%		5.24	0.64	0.42	0.41	0.31	0.29	2.60	0.65	0.14	0.30	0.49	29.80	16.46	10.85	6.87
<b>Extractions sélectives</b>																	
P rétention	%		98.47	99.33	99.67	99.59	99.60	99.79	96.21	99.30	99.70	99.54	98.92	39.45	40.15	38.95	93.84
Fe (CBD)	g/kg		122.28	73.71	119.81	108.52	161.26	90.13	106.38	127.73	118.21	85.97	119.51	14.35	8.23	12.55	83.93
Al (CBD)	g/kg		21.78	43.17	57.37	54.07	57.01	57.42	8.02	42.63	64.94	45.49	45.82	2.99	1.81	1.59	11.73
Si (CBD)	g/kg		2.84	8.32	6.89	7.66	6.35	7.89	4.26	4.84	6.03	7.90	11.44	6.32	7.00	5.62	3.51
Fe (ox.)	g/kg		86.18	15.63	31.58	28.36	54.82	17.41	83.03	66.92	39.55	30.92	24.82	6.15	4.25	10.58	65.83
Al (ox.)	g/kg		24.98	71.63	69.32	67.57	56.63	72.12	6.96	57.83	70.21	63.02	37.80	3.18	1.80	1.56	10.61
Si (ox.)	g/kg		3.59	23.30	19.60	19.97	13.81	22.65	0.64	14.28	16.58	20.42	12.83	0.56	0.22	0.19	1.11
D.O. à 430 nm									4.33	9.12	6.64	2.818	0.697	0.211	0.212	1.001	4.36
Fe (py.)	g/kg		93.32	4.30	7.46	4.79	14.00	2.91	85.59	72.51	21.59	1.95	1.87	2.83	2.93	9.65	63.81
Al (py.)	g/kg		20.72	10.23	12.13	10.51	12.14	9.95	7.56	25.27	22.10	7.82	5.49	1.36	0.99	1.21	10.65

		échantillon horizon	JGR-F18 H5	JGR-F19 H1	JGR-F19 H3	JGR-F19 H4	JGR-F19 H5	JGR-F20 H1	JGR-F20 H2	JGR-F20 H3	JGR-F20 H4	JGR-F20 H5	JGR-F20 H6	JGR-F21 H1*	JGR-F21 H2*	JGR-F21 H3*	JGR-F22 H1*
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																	
Argiles	%													46.50	56.00	66.20	51.80
Limons fins	%													27.70	15.20	21.70	28.20
Limons grossiers	%													9.20	11.20	7.50	12.00
Sables fins	%													7.70	14.70	3.00	3.20
Sables grossiers	%													8.90	2.80	1.60	4.80
<b>(sans U-S)</b>																	
Argiles	%													39.62	13.85	26.26	37.32
Limons fins	%													30.14	14.48	21.32	31.50
Limons grossiers	%													10.48	38.88	43.18	22.32
Sables fins	%													9.41	22.85	5.53	3.80
Sables grossiers	%													10.35	9.95	3.70	5.05
<b>Matière organique</b>																	
C org.	%		7.89	10.44	8.33	4.35	1.77	15.13	7.39	5.47	3.30	2.39	1.44	3.12	1.11	0.64	2.44
Azote total	‰		4.54	6.95	4.67	2.33	1.00	12.50	4.34	2.93	1.62	1.25	0.67	3.00	0.94	0.48	2.47
<b>Complexe d'échange</b>																	
Al éch KCl	me/100g		0.41	0.19	0.22	0.08	0.10	0.15	0.12	0.11	0.09	0.27	0.11	1.62	0.05	0.03	
H éch KCl	me/100g		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	
Ca éch (acétate)	me/100g		0.05	0.89	0.04	0.03	0.05	3.97	0.14	0.03	0.02	0.02	0.02	1.97	5.11	5.29	7.91
Mg éch (acétate)	me/100g		0.03	0.47	0.04	0.05	0.05	3.42	0.18	0.13	0.02	0.04	0.02	1.00	1.16	1.09	2.33
K éch (acétate)	me/100g		0.02	0.13	0.03	0.03	0.02	1.09	0.35	0.20	0.20	0.21	0.16	0.98	0.08	0.07	1.81
Na éch (acétate)	me/100g		0.02	0.07	0.03	0.07	0.06	0.09	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	0.80	0.99	0.15
CEC (acétate)	me/100g		55.61	58.01	57.25	35.67	24.25	100.57	93.67	44.81	25.71	18.68	11.57	27.06	23.92	21.76	27.67
TS (acétate)	%		0.22	2.68	0.24	0.50	0.75	8.52	0.76	0.86	1.02	1.51	1.92	14.87	29.92	34.21	44.09
<b>Extractions sélectives</b>																	
P rétention	%		99.56	99.55	99.72	99.40	98.66	99.10	99.74	99.70	99.69	99.16	97.64	78.79	93.04	88.43	66.06
Fe (CBD)	g/kg		69.70	80.49	87.52	103.51	115.07	84.17	97.68	109.04	84.43	94.56	97.22	84.29	97.17	93.89	75.84
Al (CBD)	g/kg		47.57	47.41	51.28	43.28	40.48	44.71	56.70	53.92	39.22	33.66	30.71	21.25	21.16	17.00	13.56
Si (CBD)	g/kg		7.31	6.82	6.66	7.52	14.93	4.72	5.49	5.96	5.31	5.79	5.01	5.18	3.47	3.34	3.51
Fe (ox.)	g/kg		10.94	28.22	25.98	49.12	24.34	37.53	26.63	49.63	45.87	36.69	31.08	13.16	10.80	9.59	12.63
Al (ox.)	g/kg		70.46	64.04	73.57	51.72	39.18	55.62	73.18	68.46	51.56	35.03	20.50	12.93	9.29	6.99	8.38
Si (ox.)	g/kg		21.98	18.22	21.80	15.35	18.80	12.97	14.16	17.54	13.99	9.30	5.04	3.39	2.20	1.80	2.35
D.O. à 430 nm			1.838														
Fe (py.)	g/kg		7.74	20.06	13.74	3.27	1.31	29.62	10.09	4.33	1.41	1.50	1.11	6.43	3.61	2.73	2.68
Al (py.)	g/kg		14.01	19.97	16.47	7.12	4.38	26.14	14.33	9.15	6.61	5.44	3.93	6.18	2.51	2.53	2.52

	échantillon horizon	JGR-F22 H2*		RJGRF24 H1	RJGRF24 H2	RJGRF24 H3	RJGRF24 H4	RJGRF24 altérit	RJGRF25 H1	RJGRF25 H2	RJGRF25 H3	RJGRF26 H1	RJGRF26 H2	RJGRF26 H3	RJGRF27 H1	RJGRF27 H2
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																
Argiles	%	62.60														
Limons fins	%	17.60														
Limons grossiers	%	12.90														
Sables fins	%	5.20														
Sables grossiers	%	1.70														
<b>(sans U-S)</b>																
Argiles	%	16.43														
Limons fins	%	17.90														
Limons grossiers	%	55.41														
Sables fins	%	6.67														
Sables grossiers	%	3.59														
<b>Matière organique</b>																
C org.	%	1.30		14.92	10.98	8.14	3.59	0.73	14.09	11.92	8.53	5.30	3.02	1.53	5.92	5.47
Azote total	‰	1.17		10.09	8.04	5.92	2.69	0.51	10.74	8.87	5.19	5.11	3.21	1.42	5.00	4.50
<b>Complexe d'échange</b>																
Al éch KCl	me/100g			2.06	0.24	0.09	0.03	0.01	0.51	0.49	0.08	0.09	0.00	0.00	0.32	0.03
H éch KCl	me/100g			0.41	0.15	0.11	0.06	0.04	0.57	0.30	0.10	0.06	0.05	0.02	0.23	0.05
Ca éch (acétate)	me/100g	5.81		1.40	0.08	0.07	0.05	0.09	6.66	0.45	0.09	4.11	3.52	3.23	0.77	0.33
Mg éch (acétate)	me/100g	1.31		0.85	0.15	0.17	0.09	0.12	3.05	0.31	0.07	2.27	1.03	0.70	0.26	0.14
K éch (acétate)	me/100g	0.10		0.31	0.17	0.11	0.04	0.05	0.38	0.16	0.04	0.89	0.06	0.04	0.26	0.26
Na éch (acétate)	me/100g	0.91		0.09	0.07	0.08	0.07	0.07	0.11	0.08	0.08	0.14	0.28	0.48	0.11	0.07
CEC (acétate)	me/100g	22.55		55.00	58.80	57.50	46.80	25.19	52.10	63.80	57.90	36.60	34.18	28.94	34.62	29.16
TS (acétate)	%	36.01		4.82	0.80	0.74	0.54	1.33	19.57	1.57	0.48	20.26	14.31	15.36	4.04	2.73
<b>Extractions sélectives</b>																
P rétention	%	90.90		91.25	99.65	99.62	99.60	98.25	86.11	99.60	99.64	98.33	99.16	99.07	96.95	99.29
Fe (CBD)	g/kg	94.35		67.17	59.71	46.29	40.60	40.78	62.16	100.76	88.10	91.03	90.97	99.47	94.14	100.81
Al (CBD)	g/kg	21.15		26.59	48.27	47.78	40.51	25.85	13.21	53.38	59.00	47.48	46.53	45.44	47.03	52.61
Si (CBD)	g/kg	3.69		6.12	8.09	8.67	9.00	11.27	6.57	7.86	9.19	13.31	12.03	13.86	9.52	9.18
Fe (ox.)	g/kg	11.48		36.17	23.81	11.91	6.25	27.96	38.85	40.94	20.07	15.30	17.47	13.05	25.62	29.17
Al (ox.)	g/kg	9.63		26.27	68.23	69.55	66.09	51.67	11.97	58.53	69.68	33.33	31.77	25.25	34.89	37.24
Si (ox.)	g/kg	2.25		3.96	19.28	21.85	24.00	30.67	2.17	13.58	20.15	9.86	9.18	8.47	9.06	8.81
D.O. à 430 nm				3.67	4.98	2.20	0.63	0.81	2.39	3.19						
Fe (py.)	g/kg	4.92		35.22	26.34	11.13	1.23	0.71	36.29	43.54	18.24	5.89	5.76	2.01	17.33	26.60
Al (py.)	g/kg	2.96		22.53	24.98	15.00	7.90	4.31	10.10	32.05	19.20	9.74	7.68	4.55	16.65	19.52

	échantillon horizon	RJGRF27 H3	RJGRF28 H1	RJGRF28 H2	RJGRF28 H3	RJGRF28 H4	RJGRF28 H5	RJGRF29 H1	RJGRF29 H2	RJGRF29 H3	RJGRF29 H4	RJGRF30 H1	RJGRF30 H2	RJGRF30 H3	RJGRF30 H4
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>															
Argiles	%														
Limons fins	%														
Limons grossiers	%														
Sables fins	%														
Sables grossiers	%														
<b>(sans U-S)</b>															
Argiles	%														
Limons fins	%														
Limons grossiers	%														
Sables fins	%														
Sables grossiers	%														
<b>Matière organique</b>															
C org.	%	1.58		18.80	2.80	11.22	1.08	11.55	11.77	4.60	3.91	8.05	5.11	3.83	5.65
Azote total	‰	1.07	absent	16.03	2.51	8.10	0.79	8.48	9.42	2.97	2.58	4.04	1.95	1.29	2.21
<b>Complexe d'échange</b>															
Al éch KCl	me/100g	0.00		0.62	0.80	0.64	0.02	0.25	0.24	0.00	0.00	0.09	0.03	0.00	0.00
H éch KCl	me/100g	0.02	absent	0.67	0.73	0.39	0.00	0.16	0.18	0.02	0.06	0.06	0.03	0.05	0.03
Ca éch (acétate)	me/100g	0.23		0.63	0.18	0.09	0.10	0.05	0.05	0.02	0.02	0.24	0.13	0.15	0.14
Mg éch (acétate)	me/100g	0.18		0.48	0.13	0.07	0.06	0.05	0.04	0.02	0.02	0.22	0.15	0.13	0.10
K éch (acétate)	me/100g	0.32		0.14	0.04	0.05	0.01	0.05	0.05	0.02	0.02	0.38	0.08	0.03	0.02
Na éch (acétate)	me/100g	0.08	absent	0.10	0.09	0.06	0.07	0.10	0.09	0.06	0.12	0.27	0.16	0.07	0.09
CEC (acétate)	me/100g	11.44		46.80	22.20	58.10	14.95	48.20	45.12	38.86	33.04	48.02	42.12	35.52	54.32
TS (acétate)	%	7.06		2.88	1.98	0.46	1.64	0.51	0.52	0.30	0.54	2.29	1.23	1.08	0.64
<b>Extractions sélectives</b>															
P rétention	%	90.36	absent	41.40	9.88	99.51	96.81	99.43	99.49	99.74	99.59	99.65	99.69	99.59	99.72
Fe (CBD)	g/kg	106.36		6.75	4.03	99.40	21.54	80.06	81.50	104.88	113.77	119.62	88.70	70.24	42.82
Al (CBD)	g/kg	29.92	absent	3.95	0.89	45.96	18.85	50.14	49.58	59.74	61.74	56.42	55.97	56.27	62.30
Si (CBD)	g/kg	5.25		9.55	9.42	7.73	8.44	7.68	7.39	12.67	16.70	6.75	8.23	10.37	9.45
Fe (ox.)	g/kg	12.65		4.31	2.57	45.98	14.80	37.05	37.48	28.83	37.92	35.26	25.18	20.76	6.68
Al (ox.)	g/kg	10.28	absent	3.67	0.79	63.24	37.73	50.90	52.76	66.63	56.68	69.69	69.20	68.23	75.02
Si (ox.)	g/kg	1.79		0.29	0.11	17.87	20.54	10.64	12.04	23.60	20.57	19.67	21.84	25.22	24.74
D.O. à 430 nm				0.34	0.17	8.52	0.39								
Fe (py.)	g/kg	3.87		4.29	1.92	51.51	0.69	36.10	35.05	3.82	3.81	20.45	4.37	2.14	1.07
Al (py.)	g/kg	3.68	absent	3.42	0.50	27.01	3.45	32.83	31.98	9.73	8.67	17.76	10.73	8.00	11.09

	échantillon horizon	RJGRF31 H1	RJGRF31 H2	RJGRF31 H3	RJGRF32 H1	RJGRF32 H2	RJGRF32 H3	RJGRF32 H4	RJGRF33 H1	RJGRF33 H2	RJGRF33 H3	RJGRF34 H1	RJGRF34 H2	RJGRF34 H3	RJGRF35 H1
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>															
Argiles	%	51.00	58.50	71.50					69.00	70.90	45.70	55.60	59.90	38.80	
Limons fins	%	21.50	30.40	22.00					21.80	19.00	24.50	33.10	30.30	26.80	
Limons grossiers	%	10.60	6.80	4.20					3.50	6.10	12.60	7.10	5.70	14.30	
Sables fins	%	13.30	2.80	1.70					2.70	2.40	5.70	2.50	2.50	8.40	
Sables grossiers	%	3.50	1.50	0.60					3.00	1.60	11.60	1.70	1.50	11.80	
<b>(sans U-S)</b>															
Argiles	%	31.90	40.20	28.70					42.50	68.60	38.60	32.50	36.30	27.80	
Limons fins	%	29.60	41.50	31.30					37.80	19.90	29.50	40.90	42.00	36.10	
Limons grossiers	%	24.10	13.40	36.60					10.70	7.10	12.30	16.80	12.00	12.10	
Sables fins	%	10.80	3.00	2.20					4.80	2.60	5.90	6.80	5.10	8.20	
Sables grossiers	%	3.60	1.90	1.20					4.10	1.80	13.80	3.00	4.60	15.90	
<b>Matière organique</b>															
C org.	%	3.15	2.47	0.57	3.82	1.73	0.99	1.13	2.36	1.12	0.64	2.04	0.55	0.38	7.09
Azote total	‰	3.06	2.75	0.60	3.98	1.96	0.95	0.98	2.16	1.03	0.53	2.05	0.55	0.36	4.90
<b>Complexe d'échange</b>															
Al éch KCl	me/100g	0.06	0.03	0.00	0.37	0.20	0.00	0.00	1.41	0.23	0.00	0.12	0.00	0.00	0.04
H éch KCl	me/100g	0.15	0.06	0.02	0.45	0.12	0.02	0.05	1.13	0.13	0.05	0.18	0.02	0.03	0.05
Ca éch (acétate)	me/100g	4.88	5.24	5.26	3.50	1.67	3.21	4.67	0.89	3.79	4.15	3.82	7.04	6.82	0.85
Mg éch (acétate)	me/100g	1.51	1.24	1.15	2.09	1.06	0.67	0.71	0.60	1.55	1.36	1.97	2.91	5.97	0.72
K éch (acétate)	me/100g	1.02	0.54	0.38	1.63	3.47	0.66	0.07	1.51	0.98	0.95	1.45	0.55	1.00	0.56
Na éch (acétate)	me/100g	0.15	0.29	0.82	0.15	0.15	1.20	1.06	0.09	0.60	0.73	0.13	0.86	0.75	0.08
CEC (acétate)	me/100g	26.00	25.83	24.21	33.70	28.10	24.99	30.35	21.07	20.91	23.04	22.09	22.76	24.54	43.67
TS (acétate)	%	29.07	28.26	31.43	21.87	22.56	22.96	21.43	14.67	33.08	31.21	33.30	49.89	59.26	5.04
<b>Extractions sélectives</b>															
P rétention	%	67.14	79.75	86.90	81.35	89.03	97.60	98.62	61.59	66.12	87.89	55.25	67.69	63.94	99.65
Fe (CBD)	g/kg	75.23	80.86	82.92	68.14	78.98	91.42	89.06	77.79	70.77	61.23	77.94	78.19	83.36	52.26
Al (CBD)	g/kg	16.35	17.28	15.66	22.65	20.24	32.15	40.81	12.54	11.44	13.97	10.94	8.54	8.32	41.88
Si (CBD)	g/kg	3.32	3.12	3.30	5.70	5.03	11.61	17.19	3.02	2.55	3.70	3.34	4.30	5.29	10.36
Fe (ox.)	g/kg	7.60	8.78	8.49	15.85	15.00	16.00	17.65	9.37	7.21	5.81	6.75	8.45	9.40	10.19
Al (ox.)	g/kg	6.62	7.46	6.30	17.13	12.37	19.76	33.95	5.37	5.42	14.72	4.34	4.31	4.72	68.26
Si (ox.)	g/kg	1.40	1.45	1.77	4.48	3.55	8.34	17.87	0.96	1.09	6.15	1.07	1.76	1.99	24.16
D.O. à 430 nm															
Fe (py.)	g/kg	5.54	4.57	0.77	11.63	6.34	1.77	0.84	4.91	2.35	1.81	2.72	0.20	0.23	3.59
Al (py.)	g/kg	3.52	3.02	1.06	10.21	4.42	3.01	3.37	3.18	1.75	2.02	1.76	0.65	0.61	10.19

	échantillon horizon	RJGRF35 H2	RJGRF35 H3	RJGRF35 H4	RJGRF35 H5	RJGRF36 H1	RJGRF36 H2	RJGRF36 H3	RJGRF37 H1	RJGRF37 H2	RJGRF37 H3	RJGRF38 H1	RJGRF38 H2	RJGRF38 H3	RJGRF39 H1
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>															
Argiles	%											51.40	51.20	36.00	
Limons fins	%											30.80	30.40	16.80	
Limons grossiers	%											7.30	12.90	7.10	
Sables fins	%											4.80	3.70	16.10	
Sables grossiers	%											5.70	1.90	24.00	
<b>(sans U-S)</b>															
Argiles	%											47.50	51.20	31.80	
Limons fins	%											34.80	30.40	27.30	
Limons grossiers	%											7.60	12.90	11.60	
Sables fins	%											4.50	3.70	15.40	
Sables grossiers	%											5.60	1.90	13.90	
<b>Matière organique</b>															
C org.	%	4.65	0.98	3.74	4.10	10.86	5.29	1.58	5.96	2.03	1.33	3.93	3.04	1.33	3.99
Azote total	‰	2.29	0.35	1.99	2.00	7.28	3.05	0.95	5.24	1.41	1.05	3.68	3.23	1.04	4.42
<b>Complexe d'échange</b>															
Al éch KCl	me/100g	0.01	0.03	0.04	0.01	0.19	0.03	0.03	0.07	0.07	0.03	0.21	0.01	0.01	0.18
H éch KCl	me/100g	0.02	0.00	0.04	0.04	0.11	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03	0.25	0.05	0.02	0.15
Ca éch (acétate)	me/100g	0.04	0.03	0.03	0.03	0.82	0.04	0.05	8.21	1.42	0.54	4.87	8.21	5.86	4.87
Mg éch (acétate)	me/100g	0.06	0.03	0.08	0.08	0.99	0.09	0.17	2.77	0.72	0.31	2.03	1.69	0.80	1.50
K éch (acétate)	me/100g	0.06	0.03	0.32	0.12	0.61	0.21	0.25	1.56	2.04	0.80	0.83	0.09	0.08	2.03
Na éch (acétate)	me/100g	0.04	0.04	0.12	0.08	0.09	0.03	0.04	0.14	0.20	0.13	0.15	0.49	0.91	0.24
CEC (acétate)	me/100g	44.97	25.29	44.07	51.37	52.57	41.17	20.99	43.77	37.61	26.40	32.33	31.29	29.15	36.17
TS (acétate)	%	0.42	0.47	1.25	0.59	4.77	0.89	2.38	28.97	11.64	6.75	24.38	33.51	26.22	23.88
<b>Extractions sélectives</b>															
P rétention	%	99.82	99.28	99.64	99.83	99.55	99.80	99.23	95.17	99.43	99.08	77.05	87.77	95.94	83.75
Fe (CBD)	g/kg	55.90	22.97	99.29	80.58	75.87	107.06	91.56	92.11	105.73	103.08	80.07	123.96	87.49	75.64
Al (CBD)	g/kg	48.76	43.18	51.67	61.08	42.95	65.18	47.79	43.70	71.82	62.48	20.88	56.99	25.04	24.07
Si (CBD)	g/kg	12.28	21.43	17.25	18.53	7.30	11.88	14.43	10.89	34.39	30.77	5.39	8.24	5.79	7.02
Fe (ox.)	g/kg	9.07	14.23	26.59	16.07	30.84	19.15	18.33	30.56	30.05	23.80	11.09	11.27	11.64	18.35
Al (ox.)	g/kg	65.98	63.43	65.28	70.34	65.39	67.43	38.71	44.66	49.76	45.32	12.99	13.36	18.69	18.35
Si (ox.)	g/kg	22.67	34.91	24.84	23.96	19.90	19.55	15.76	14.59	22.50	22.35	3.32	2.74	6.93	5.12
D.O. à 430 nm															
Fe (py.)	g/kg	1.13	0.41	4.04	1.32	25.46	2.50	1.16	11.21	2.39	1.19	8.40	8.65	4.14	10.77
Al (py.)	g/kg	8.76	4.63	7.92	8.46	20.72	9.36	4.60	12.35	6.36	5.32	7.26	7.03	5.16	9.42

	échantillon horizon	RJGRF39 H2	RJGRF39 H3	RJGRF40 H1	RJGRF40 H2	RJGRF40 H3	RJGRF41 H1	RJGRF41 H2	RJGRF41 H3	RJGRF41 H4	RJGRF41 H5	RJGRF41 H6	RJGRF41 H7	RJGRF42 H1	RJGRF42 H2
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>															
Argiles	%			16.90	9.30	10.10									
Limons fins	%			24.00	23.80	18.50									
Limons grossiers	%			13.10	28.70	25.20									
Sables fins	%			22.80	25.70	30.20									
Sables grossiers	%			23.20	12.50	15.90									
<b>(sans U-S)</b>															
Argiles	%			4.50	< 1.0	0.20									
Limons fins	%			21.00	9.10	12.80									
Limons grossiers	%			13.00	14.00	18.40									
Sables fins	%			26.30	29.20	32.70									
Sables grossiers	%			35.10	49.20	35.90									
<b>Matière organique</b>															
C org.	%	1.06	0.81	3.56	0.85	1.05	25.70	1.82	0.84	2.16	8.94	9.54	5.48	7.86	6.24
Azote total	‰	0.96	0.63	3.16	0.60	0.85	19.75	1.66	0.72	1.65	5.10	5.66	3.11	5.32	3.00
<b>Complexe d'échange</b>															
Al éch KCl	me/100g	0.08	0.06	0.12	0.01	0.09	0.00	0.09	0.32	0.23	6.76	3.34	0.18	0.10	0.00
H éch KCl	me/100g	0.06	0.05	0.00	0.02	0.00	0.52	0.53	0.72	0.33	1.28	0.48	0.00	0.05	0.06
Ca éch (acétate)	me/100g	3.63	2.14	2.34	0.32	0.48	6.02	0.37	0.51	0.20	0.22	0.08	0.03	1.20	0.04
Mg éch (acétate)	me/100g	0.74	0.70	0.74	0.15	0.12	2.86	0.18	0.21	0.10	0.34	0.18	0.05	0.28	0.04
K éch (acétate)	me/100g	0.08	0.21	1.02	0.11	0.08	0.53	0.06	0.04	0.02	0.07	0.04	0.03	0.09	0.03
Na éch (acétate)	me/100g	0.71	0.76	0.07	0.04	0.08	0.26	0.08	0.09	0.04	0.07	0.05	0.05	0.05	0.03
CEC (acétate)	me/100g	28.60	35.75	34.85	23.83	19.99	55.85	17.98	19.57	8.77	46.25	56.45	52.85	45.05	44.25
TS (acétate)	%	18.02	10.64	11.94	2.54	3.83	17.33	3.90	4.26	4.08	1.52	0.62	0.28	3.58	0.31
<b>Extractions sélectives</b>															
P rétention	%	90.17	97.37	97.51	99.17	98.96	3.02	4.43	3.44	4.30	94.33	98.92	99.66	99.57	99.71
Fe (CBD)	g/kg	91.30	99.54	93.78	138.13	131.26	1.80	0.92	1.66	2.01	72.56	88.92	75.13	90.95	140.74
Al (CBD)	g/kg	18.92	28.99	40.92	48.72	47.30	0.79	0.23	0.35	0.32	9.56	30.53	53.51	52.00	58.67
Si (CBD)	g/kg	4.88	10.55	14.66	25.95	23.19	12.26	11.84	11.50	9.31	5.68	8.44	15.70	7.95	6.62
Fe (ox.)	g/kg	18.71	15.88	21.87	28.98	28.88	0.78	0.25	0.95	0.59	56.60	59.61	14.17	24.26	39.68
Al (ox.)	g/kg	10.99	17.48	36.52	41.08	35.04	0.80	0.20	0.30	0.26	8.41	45.69	68.25	64.56	62.24
Si (ox.)	g/kg	2.99	6.66	14.04	20.55	16.22	0.15	0.03	0.04	0.05	1.12	16.27	24.68	19.82	15.79
D.O. à 430 nm							0.07	0.01	0.10	0.05	5.35	6.87	2.15		
Fe (py.)	g/kg	4.78	3.18	5.13	0.92	1.99	0.52	0.24	0.88	0.46	61.55	57.84	3.23	10.95	6.01
Al (py.)	g/kg	2.90	3.37	7.62	4.34	4.65	0.44	0.03	0.07	0.05	9.01	21.73	9.27	14.76	10.92

		échantillon horizon	RJGRF42 H3	RJGRF42 H4	RJGRF42 H5	RJGRF43 H1	RJGRF43 H2	RJGRF43 H3	RJGRF44 H1	RJGRF44 H2	RJGRF44 H3	RJGRF45 H1	RJGRF45 H2	RJGRF45 H3	RJGRF46 H1	RJGRF47 H1
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																
Argiles	%				48.70	84.50	45.90	74.50	67.90	53.50					54.70	11.80
Limons fins	%				30.20	11.10	25.10	18.80	22.80	30.30					24.00	8.00
Limons grossiers	%				10.50	2.00	12.20	3.30	5.00	9.40					14.70	5.10
Sables fins	%				7.40	1.60	12.50	1.80	3.00	5.20					3.20	11.30
Sables grossiers	%				3.20	0.90	4.30	1.60	1.30	1.60					3.40	63.80
<b>(sans U-S)</b>																
Argiles	%				36.90	84.80	23.70	72.10	63.20	50.50					51.40	9.20
Limons fins	%				31.70	10.60	19.10	19.50	24.10	31.10					23.40	8.60
Limons grossiers	%				11.50	1.90	10.80	3.40	5.60	11.10					14.60	4.50
Sables fins	%				10.80	1.60	17.80	2.50	4.40	5.70					4.10	11.70
Sables grossiers	%				9.10	1.10	28.60	2.60	2.70	1.60					6.50	66.10
<b>Matière organique</b>																
C org.	%		6.36	5.73	4.71	3.73	1.94	0.96	2.41	0.78	0.34	2.75	1.66	0.57	2.16	5.02
Azote total	‰		3.08	2.96	2.41	3.29	1.84	0.73	2.44	0.77	0.31	2.87	1.91	0.51	2.01	1.07
<b>Complexe d'échange</b>																
Al éch KCl	me/100g		0.00	0.00	0.00	0.55	0.22	0.06	0.03	0.00	0.01	0.43	0.00	0.00	0.01	0.00
H éch KCl	me/100g		0.07	0.08	0.10	0.41	0.14	0.00	0.09	0.03	0.02	0.50	0.04	0.04	0.20	0.05
Ca éch (acétate)	me/100g		0.03	0.02	0.04	2.80	2.64	1.48	5.03	3.86	5.00	2.65	7.21	5.45	3.65	36.05
Mg éch (acétate)	me/100g		0.04	0.03	0.03	1.52	1.07	0.47	2.76	1.29	2.07	0.88	0.96	0.55	1.92	5.02
K éch (acétate)	me/100g		0.07	0.05	0.03	0.59	0.14	0.09	2.27	2.30	1.09	1.36	0.09	0.06	1.62	1.30
Na éch (acétate)	me/100g		0.03	0.09	0.04	0.12	0.57	0.63	0.32	0.67	0.82	0.13	0.69	0.96	0.15	0.25
CEC (acétate)	me/100g		51.75	46.65	45.15	26.22	25.21	22.02	24.95	22.40	21.06	22.88	24.14	24.56	21.34	16.07
TS (acétate)	%		0.31	0.42	0.32	19.20	17.54	12.09	41.60	36.27	42.64	21.95	37.05	28.61	34.42	> 100
<b>Extractions sélectives</b>																
P rétention	%		99.71	99.74	99.75	86.57	87.96	98.08	18.25	47.88	31.25	46.62	84.22	79.49	46.47	89.43
Fe (CBD)	g/kg		99.69	99.52	87.00	88.06	93.80	103.47	84.74	83.82	72.48	90.49	90.52	76.61	75.35	11.83
Al (CBD)	g/kg		63.65	56.63	23.58	30.44	20.11	30.35	12.65	11.35	7.41	17.12	17.02	12.91	8.18	1.37
Si (CBD)	g/kg		8.23	8.25	5.49	10.48	2.77	9.03	3.25	3.47	3.59	3.39	3.19	3.43	4.31	5.17
Fe (ox.)	g/kg		25.81	26.44	41.15	12.72	8.87	12.74	8.58	9.48	5.41	8.26	8.27	7.16	4.73	6.78
Al (ox.)	g/kg		71.15	68.77	64.45	15.57	7.60	15.92	5.01	5.64	4.36	6.00	6.24	5.60	3.31	1.79
Si (ox.)	g/kg		19.52	19.43	18.02	3.89	1.39	5.32	1.14	1.52	1.23	1.04	1.27	1.62	0.80	2.24
D.O. à 430 nm																
Fe (py.)	g/kg		3.48	3.90	2.78	12.78	13.02	3.92	5.14	1.25	0.17	7.22	3.90	0.92	1.52	0.15
Al (py.)	g/kg		10.63	9.91	8.23	9.56	5.38	4.19	2.49	1.41	0.71	4.05	2.10	1.07	1.42	0.13



		échantillon horizon	RJGRF47 H2	RJGRF48 H1	RJGRF48 H2	RJGRF49 H1	RJGRF50 H1	RJGRF50 H2	RJGRF51 H1	RJGRF51 H2	RJGRF52 H1	RJGRF52 H2	RJGRF52 H3	RJGRF53 H1	RJGRF54 H1	RJGRF55 H1
<b>Granulométrie (avec U-S)</b>																
Argiles	%		20.40	20.00	4.20	24.50	70.00	69.80			62.60	64.90	65.10	73.20	75.50	30.50
Limons fins	%		14.60	17.10	8.10	23.20	23.20	23.90			25.20	23.20	22.50	19.00	16.50	31.40
Limons grossiers	%		7.90	9.60	7.40	11.80	3.30	3.80			8.20	8.30	9.80	2.40	2.70	10.90
Sables fins	%		21.40	14.40	21.30	15.30	2.00	1.80			2.20	2.40	1.70	2.00	2.30	10.70
Sables grossiers	%		35.60	39.00	58.90	25.20	1.50	0.70			1.90	1.20	0.90	3.40	3.10	16.50
<b>(sans U-S)</b>																
Argiles	%		17.10	14.00	4.70	24.60	66.90	72.40			61.60	67.90	59.80	71.50	74.50	16.60
Limons fins	%		13.40	18.00	9.70	21.20	26.00	22.30			28.40	24.10	25.20	19.50	16.60	37.80
Limons grossiers	%		7.30	11.00	9.10	13.00	3.10	3.40			6.10	4.70	10.50	3.10	3.50	12.10
Sables fins	%		19.90	16.70	20.20	16.90	2.10	1.40			2.00	2.20	2.80	2.30	2.30	14.20
Sables grossiers	%		42.30	40.40	56.30	24.40	1.90	0.50			1.90	1.00	1.70	3.60	3.10	19.40
<b>Matière organique</b>																
C org.	%		0.86	0.43	0.03	1.20	1.58	0.59	1.48	0.59	2.77	0.64	0.45	1.60	0.69	2.69
Azote total	‰		0.87	0.45	0.04	1.02	1.48	0.51	1.00	0.47	2.60	0.50	0.30	1.47	0.71	2.38
<b>Complexe d'échange</b>																
Al éch KCl	me/100g		0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.04	0.16	1.12	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
H éch KCl	me/100g		0.07	0.07	0.02	0.06	0.40	0.00	0.07	0.29	0.03	0.00	0.01	0.01	0.06	0.00
Ca éch (acétate)	me/100g		18.63	31.80	28.59	25.58	3.17	3.45	0.23	0.44	4.96	3.97	4.14	20.53	16.13	11.01
Mg éch (acétate)	me/100g		7.44	17.16	16.39	15.97	2.85	4.60	0.18	0.17	2.01	0.89	0.99	15.20	17.08	11.40
K éch (acétate)	me/100g		1.11	0.21	0.05	1.59	0.60	0.38	0.47	0.33	2.04	0.34	0.23	0.17	0.11	0.51
Na éch (acétate)	me/100g		0.21	0.44	0.61	0.24	0.17	0.78	0.45	0.79	0.18	1.04	0.92	0.92	2.28	3.31
CEC (acétate)	me/100g		22.41	39.86	41.16	38.46	22.55	20.83	26.03	25.75	22.51	22.49	22.63	37.52	34.72	27.38
TS (acétate)	%		> 100	> 100	> 100	> 100	30.08	44.21	5.10	6.71	40.79	27.75	27.72	98.14	> 100	95.73
<b>Extractions sélectives</b>																
P rétention	%		20.20	17.10	10.54	12.47	59.74	69.66	98.05	93.09	66.32	82.55	68.04	40.40	49.82	72.33
Fe (CBD)	g/kg		27.82	21.32	19.87	20.32	82.80	79.36	102.41	79.41	82.78	85.20	77.95	45.89	62.97	62.34
Al (CBD)	g/kg		2.53	2.45	1.98	2.62	8.73	7.95	31.83	18.25	14.55	14.03	10.18	4.72	6.24	13.71
Si (CBD)	g/kg		10.42	12.03	13.12	12.48	3.86	3.55	14.75	15.87	3.80	3.70	3.92	8.48	6.08	6.92
Fe (ox.)	g/kg		23.87	3.44	2.75	3.82	5.62	7.52	18.23	64.99	7.03	7.62	5.24	7.80	5.76	14.37
Al (ox.)	g/kg		3.00	3.03	2.44	2.68	3.58	3.78	27.89	23.10	5.52	5.75	4.76	2.57	2.73	12.90
Si (ox.)	g/kg		5.33	1.72	1.44	1.31	0.92	1.47	11.27	17.89	1.24	1.87	1.52	1.57	1.75	6.25
D.O. à 430 nm																
Fe (py.)	g/kg		0.34	0.22	0.22	0.40	0.99	0.26	1.77	0.89	4.54	1.14	0.59	0.55	0.18	1.80
Al (py.)	g/kg		0.19	0.16	0.10	0.18	1.09	0.64	4.29	3.60	2.77	1.17	0.94	0.36	0.22	1.68

	échantillon horizon	RJGRF55 H2	RJGRF56 H1	RJGRF57 H1
<b>Granulométrie</b>				
<b>(avec U-S)</b>				
Argiles	%	21.50	34.80	45.80
Limons fins	%	32.00	26.80	28.80
Limons grossiers	%	11.40	10.40	9.50
Sables fins	%	13.60	11.90	4.80
Sables grossiers	%	21.40	16.00	11.20
<b>(sans U-S)</b>				
Argiles	%	8.70	30.90	45.20
Limons fins	%	35.50	28.40	30.40
Limons grossiers	%	14.60	11.30	10.10
Sables fins	%	14.70	12.30	5.20
Sables grossiers	%	26.50	17.10	9.20
<b>Matière organique</b>				
C org.	%	1.43	2.99	0.79
Azote total	‰	1.23	2.80	0.82
<b>Complexe d'échange</b>				
Al éch KCl	me/100g	0.00	0.06	0.03
H éch KCl	me/100g	0.00	0.00	0.00
Ca éch (acétate)	me/100g	10.22	24.87	10.24
Mg éch (acétate)	me/100g	14.57	17.93	2.83
K éch (acétate)	me/100g	0.10	1.77	0.44
Na éch (acétate)	me/100g	4.12	0.35	0.68
CEC (acétate)	me/100g	20.95	36.66	20.97
TS (acétate)	%	> 100	> 100	67.64
<b>Extractions sélectives</b>				
P rétention	%	80.05	18.79	53.68
Fe (CBD)	g/kg	59.81	18.88	81.85
Al (CBD)	g/kg	13.21	2.43	7.16
Si (CBD)	g/kg	6.42	9.80	5.88
Fe (ox.)	g/kg	11.11	5.53	6.02
Al (ox.)	g/kg	11.78	4.33	3.60
Si (ox.)	g/kg	5.31	4.15	1.60
D.O. à 430 nm				
Fe (py.)	g/kg	0.85	0.70	0.26
Al (py.)	g/kg	1.20	0.27	0.58